

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivana Vukušić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Gojko Marić, dipl. ing.

Student:

Ivana Vukušić

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Najviše se zahvaljujem mentoru izv.prof.dr.sc. Gojku Mariću na pomoći, susretljivosti i brojnim savjetima prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujem mu jer je prije svega kvalitetna i razborita osoba, jer posao mentora odrađuje najbolje moguće, a jednako tako i posao profesora. Zahvaljujem mu jer me prije nekoliko godina na svojim predavanjima zainteresirao za temu o kojoj sam pisala u diplomskom radu.

Veliko hvala tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na nesebičnoj pomoći oko izrade eksperimentalnog dijela rada. Zahvaljujem mu jer je predano radio kako bi na vrijeme imala rezultate i izvan svog radnog vremena i jer je strpljivo prenosio svoje znanje kako bi u potpunosti usvojila cijeli proces izrade, ispitivanja i interpretiranja rezultata.

Zahvaljujem izv.prof.dr.sc. Antoneti Tomljenović sa Tekstilno – tehnološkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu na ustupanju materijala.

Zahvaljujem doc. dr. sc. Tatjani Haramini i izv.prof.dr.sc. Krešimiru Grilecu na potpori.

Zahvaljujem dečku na pomoći i podršci tokom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na razumijevanju i potpori koju su mi pružili tijekom studiranja.

Ivana Vukušić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Ivana Vukušić

Mat. br.: 0035174775

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**USPOREDBA MEHANIČKIH SVOJSTAVA KOMPOZITA
OJAČANIH PRIRODNIM I STAKLENIM VLAKNIMA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES OF
COMPOSITES REINFORCED WITH NATURAL AND GLASS
FIBER**

Opis zadatka:

Nestašica fosilnih goriva kao i svijest o prekomjernom zagađenju okoliša navodi nas na zamjenu materijala ograničenih resursa s prirodnim obnovljivim materijalima.

Na tragu toga je i tema ovog rada gdje će se uspoređivati mehanička svojstva kompozita čija će matrica biti poliester (UP) a ojačalo će biti roving, jednom od staklenih vlakana, a drugi put od prirodnih vlakana. Pri tome će se paziti da ojačala budu, što je više moguće, jednakog izgleda i gustoće tkanja. Razlog tome je što to izuzetno utječe na buduća svojstva kompozita.

Za potrebe ispitivanja potrebno je izraditi uzorke polimernih kompozita s poliesterskom (UP) matricom i ojačalima od prirodnih vlakana odnosno staklenih vlakana, ispitati i usporediti dobivene podatke o:

- Vlačnoj čvrstoći
- Savojnoj čvrstoći
- Tvrdoci
- Žilavosti.

Na osnovi dobivenih rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava pristupnica će zaključiti o primjenjivosti kompozita ojačanih materijalima obnovljivog porijekla te mogu li oni zamijeniti ojačala od staklenih vlakana.

Zadatak zadan:

25. rujna 2014.

Rok predaje rada:

27. studenog 2014.

Predvideni datum obrane:

3., 4. i 5. prosinca 2014.

Zadatak zadan:

Izv.prof.dr.sc. Gojko Marić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI OBNOVLJIVOG PORIJEKLA	2
2.1. Prirodna ojačala.....	2
2.1.1. Ojačala biljnog porijekla.....	4
2.1.2. Ojačala životinjskog porijekla	9
2.2. Prirodne matrice	11
2.2.1. Bio-polimeri na škrobnoj osnovi	15
2.2.2. Biopolimeri na celuloznoj osnovi	16
2.2.3. Biopolimeri na bazi soje	18
2.2.4. Poliesteri polilaktičke kiseline (PLA)	19
2.2.5. Poli(hidroksialkanoati) (PHA)	20
2.2.6. Poli(3 - hidroksibutirat) (PHB) Poli(3 - hidroksibutirat)	21
2.2.7. Ostali biorazgradivi polimeri	22
3. EKSPERIMENTALNI DIO	23
3.0.1. Rastezna čvrstoća.....	24
3.0.2. Savojna čvrstoća	26
3.0.3. Međuslojna čvrstoća	27
3.0.4. Tvrdća	29
3.0.5. Udarne žilavost	29
3.1. Uzorak 1. Kompozit ojačan s dva sloja lanene tkanine	30
3.1.1. Rastezna čvrstoća.....	32
3.1.2. Savojna čvrstoća	35
3.1.3. Međuslojna čvrstoća	38
3.1.4. Tvrdća	39
3.1.5. Udarne žilavost	39
3.2. Uzorak 2. Kompozit ojačan s četiri sloja staklene tkanine	40
3.2.1. Rastezna čvrstoća.....	41
3.2.2. Savojna čvrstoća	44
3.2.3. Međuslojna čvrstoća	46
3.2.4. Tvrdća	47
3.2.5. Udarne žilavost	48
3.3. Uzorak 3. Kompozit ojačan s dva sloja staklene tkanine.....	49
3.3.1. Rastezna čvrstoća.....	50
3.3.2. Savojna čvrstoća	53
3.3.3. Međuslojna čvrstoća	55
3.3.4. Tvrdća	56
3.3.5. Udarne žilavost	56
3.4. Uzorak 4. Kompozit ojačan s jednim slojem staklene tkanine i jednim slojem lanene tkanine.....	57
3.4.1. Rastezna čvrstoća.....	58
3.4.2. Savojna čvrstoća	60
3.4.3. Međuslojna čvrstoća	63

3.4.4.	Tvrdoća	64
3.4.5.	Udarna žilavost	65
3.5.	Uzorak 5. Kompozit ojačan s dva sloja staklene tkanine i jednim slojem lanene tkanine.....	65
3.5.1.	Rastezna čvrstoća.....	66
3.5.2.	Savojna čvrstoća	69
3.5.3.	Međuslojna čvrstoća	72
3.5.4.	Tvrdoća	73
3.5.5.	Udarna žilavost	73
3.6.	Usporedba mehaničkih svojstava svih uzoraka	74
3.6.1.	Rastezna čvrstoća.....	74
3.6.2.	Savojna čvrstoća	76
3.6.3.	Međuslojna čvrstoća	78
3.6.4.	Tvrdoća	79
3.6.5.	Udarna žilavost	80
4.	ZAKLJUČAK.....	81
	LITERATURA.....	82

POPIS SLIKA

Slika 1. Prirodna vlakna biljnog i životinjskog podrijetla [3]	3
Slika 2. Lan [5]	4
Slika 3. Lanena vlakna [7]	5
Slika 4. Lijevo drveno brašno, desno proizvodi ojačani drvnim brašnom [10]	6
Slika 5. Konoplja [11]	7
Slika 6. Vlakna od konoplje [11]	7
Slika 7. Curaua vlakna [12]	8
Slika 8. SEM slike za jednostavna tkanja tekstila (a)lan, (b)konoplja, (c) i (d)svila, (e) i (f) poprečni presjeci vlakana svile [14]	9
Slika 9. Uvećano vlakno vune [16]	10
Slika 10. Klasifikacija plastomernih materijala s obzirom na razgradljivost i osnovu od koje su načinjeni [19]	12
Slika 11. Idealni zatvoreni životni ciklus biorazgradivih proizvoda [21]	14
Slika 12. Biljke iz kojih se dobiva škrob [22]	15
Slika 13. Plantaža pamuka [25]	17
Slika 14. Soja [26]	18
Slika 15. Način opterećivanja epruvete pri statičkom rasteznom ispitivanju [32]	24
Slika 16. Shema ispitivanja savojne čvrstoće [34]	26
Slika 17. Shema ispitivanja međuslojne čvrstoće[34]	28
Slika 18. Prekrivanje podloge smolom	30
Slika 19. Polaganje lanenih tkanina	30
Slika 20. Kompozit ojačan s dva sloja lanenih vlakana	31
Slika 21. Rezanje rubova kompozita	32
Slika 22. Epruvete kompozita	32
Slika 23. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 1	34
Slika 24. Epruvete uzorka 1 za savojno ispitivanje prije i poslije opterećivanja	35
Slika 25. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 2	37
Slika 26. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće	38
Slika 27. Charpy-ev bat za mjerenje udarnog rada loma	39
Slika 28. Lijevo- nanošenje smole na podlogu, sredina- polaganje vlakana, desno-nanošenje smole na položena vlakna	40
Slika 29. Lijevo- kompozitna ploča, desno-kompozitna ploča bez rubova	41
Slika 30. Epruvete prije i poslije rasteznog ispitivanja	41
Slika 31. Produljenja pri opterećenjima za uzorak 2	43
Slika 32. Epruvete prije i poslije ispitivanja savojne čvrstoće	44
Slika 33. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 2	45
Slika 34. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće	46
Slika 35. Uređaj za mjerenje tvrdoće Wwick 3106	47
Slika 36. Epruvete za ispitivanje udarnog rada loma	48
Slika 37. Kompozitna ploča ojačana s dva sloja stakla	49
Slika 38. Epruvete prije i poslije ispitivanja rastezne čvrstoće	50
Slika 39. Kidanje epruvete prilikom statičkog rasteznog pokusa	50
Slika 40. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 3	51
Slika 41. Epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće	53
Slika 42. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 3	54
Slika 43. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće	55

Slika 44. Kompozit ojačan staklenim i lanenim pletivom	57
Slika 45. Epruvete prije i poslije ispitivanja rastezne čvrstoće uzorka 4	58
Slika 46. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 4	59
Slika 47. Epruvete prije i poslije ispitivanja savojne čvrstoće uzorka 4	60
Slika 48. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 4	62
Slika 49. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće uzorka 4	63
Slika 50. Kompozit ojačan s dva staklena i lanenom tkaninom	65
Slika 51. Epruvete prije i poslije ispitivanja rastezne čvrstoće uzorka 5	66
Slika 52. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5	68
Slika 53. Epruvete prije i poslije ispitivanja savojne čvrstoće uzorka 5	69
Slika 54. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5	70
Slika 55. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće uzorka 5	72
Slika 56. Usporedba uzoraka prema rasteznoj čvrstoći	75
Slika 57. Usporedba uzoraka prema modulu elastičnosti	75
Slika 58. Usporedba savojnih čvrstoća	76
Slika 59. Dijagram usporedbe ispitnih uzoraka prema međuslojnoj čvrstoći	78
Slika 60. Usporedba uzoraka prema tvrdoći	79
Slika 61. Usporedba uzoraka prema udarnom radu loma	80

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba fizikalnih svojstava nekih biopolimera [24]	16
Tablica 2. Svojstva kompozita sa različitim matricama ojačanih 181-G staklom [27].....	19
Tablica 3. Lanena tkanina	23
Tablica 4. Staklena tkanina	23
Tablica 5. Svojstva POLIPOL 3401-TA-H-17 [30].....	24
Tablica 6. Produljenja pri opterećenju za uzorak 1	33
Tablica 7. Jednadžbe pravca ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 1	34
Tablica 8. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 1	35
Tablica 9. Progibi pri opterećenjima za uzorak 1	36
Tablica 10. Jednadžbe pravca ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 2	37
Tablica 11. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 1	37
Tablica 12. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 1	38
Tablica 13. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće uzorka 1	39
Tablica 14. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 1	40
Tablica 15. Prikaz volumnih i masenih udjela uzorka 2	40
Tablica 16. Produljenja pri opterećenju za uzorak 2	42
Tablica 17. Jednadžbe pravca ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 2	43
Tablica 18. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 2	43
Tablica 19. Progibi pri opterećenjima za uzorak 2	44
Tablica 20. Jednadžbe pravca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak 2	45
Tablica 21. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 2	46
Tablica 22. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 2	47
Tablica 23. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće uzorka 2	48
Tablica 24. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 2	49
Tablica 25. Prikaz volumnih i masenih udjela uzorka 3	49
Tablica 26. Produljenja pri opterećenju za uzorak 3	51
Tablica 27. Jednadžbe pravca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak 3	52
Tablica 28. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 3	52
Tablica 29. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 3	53
Tablica 30. Jednadžbe pravca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak	54
Tablica 31. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 3	55
Tablica 32. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 3	55
Tablica 33. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka 3	56
Tablica 34. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 3	56
Tablica 35. Prikaz volumnih i masenih udjela uzorka 4	57
Tablica 36. Produljenja pri opterećenju za uzorak 4	58
Tablica 37. Jednadžbe pravca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak 4	59
Tablica 38. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 4	60
Tablica 39. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 4	61
Tablica 40. Jednadžbe pravca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak 4	62
Tablica 41. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 4	63
Tablica 42. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 4	64
Tablica 43. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka 4	64
Tablica 44. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 4	65
Tablica 45. Prikaz volumnih i masenih udjela uzorka 5	66
Tablica 46. Produljenja pri opterećenju za uzorak 5	67
Tablica 47. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5	68

Tablica 48. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 5	68
Tablica 49. Jednadžbe pravaca ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5	70
Tablica 50. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5	71
Tablica 51. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 5	71
Tablica 52. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 5	72
Tablica 53. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće uzorka 5	73
Tablica 54. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 5	73
Tablica 55. Usporedba volumnih i masenih udjela	74
Tablica 56. Usporedba uzoraka prema rasteznoj čvrstoći i modulu elastičnosti	74
Tablica 57. Usporedba savojnih čvrstoća i savojnih modula elastičnosti svih uzoraka	76
Tablica 58. Usporedba međuslojne čvrstoće	78
Tablica 59. Usporedba tvrdoća	79
Tablica 60. Usporedba udarne žilavosti uzoraka	80

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	istezljivost
A_{cu}	kJ/m^2	udarni rad loma
b	mm	širina ispitnog tijela
D	mm	promjer kuglice
E	MPa	modul elastičnosti
E_c	J	energija loma
E_s	MPa	savojni modul elastičnosti
F_{max}	N	maksimalna sila opterećenja
h	mm	debljina
h	mm	debljina ispitnog tijela
H	MPa	tvrdoća
h_k	mm	dubina prodiranja kuglice
l	m	duljina
L	mm	razmak između oslonaca
L_0	mm	početna duljina epruvete
m	kg	masa
R_m	MPa	rastezna čvrstoća
R_{ms}	MPa	savojna čvrstoća
S	-	standardna devijacija
S_0	mm^2	površina početnog presjeka
T_g	$^{\circ}\text{C}$	temperatura staklišta
T_m	$^{\circ}\text{C}$	maksimalna radna temperatura
V	mm^3	volumen
w	%	maseni udio
\bar{X}	-	aritmetička sredina
ΔL_u	mm	produljenje
ε	mm/mm	istezanje
ρ	g/cm^3	specifična gustoća
σ	MPa	naprezanje
τ	MPa	međuslojna čvrstoća
ϕ	%	volumni udio

SAŽETAK

Osiromašeni resursi ruda i nafte zajedno s pojačanim propisima o zaštiti okoliša sinergijski daju poticaj za razvoj i primjenu novih materijala i proizvoda kompatibilnih s okolišem. Za zbrinjavanje kompozitnog otpada još ne postoji potpuno i adekvatno rješenje. Energetska uporaba (spaljivanje) je jedno od mogućih rješenja, no vlakna nije moguće energetske oporabiti. Moguće je reciklirati ostatak vlakana no ona imaju slabija mehanička svojstva od proizvedenih. Osim toga jedina ekonomski opravdana reciklaža je za ugljična vlakna. Jedno od rješenja bi bila uporaba prirodnih ojačala jer bi ona izgorila zajedno s matricom. U ovom radu su opisane karakteristike nekih prirodnih ojačala. Također su opisani bio-polimeri koji bi se mogli koristiti kao smola kod izrade kompozita. Kompozit izrađen od bio-polimerne smole i prirodnog ojačala naziva se zeleni kompozit. Takvi kompoziti bi se mogli kompostirati u posebnim kompostanama uz određene uvjete prilikom kojih dolazi do kompostiranja. Osim opisa prirodnih ojačala i prirodnih matrica ispitana su svojstva kompozita ojačanog lanenom tkaninom, te je prikazana usporedba svojstava nekoliko uzoraka kompozita ojačanih sa staklenim, lanenim vlaknima i kombinacija. Cilj je bio provjeriti usporedivost lanenih vlakana sa staklenim.

Ključne riječi: lan, staklena vlakna, prirodna ojačala, prirodne matrice

SUMMARY

Impoverished resources of ores and oil, together with the increased environmental regulations, provide the incentive for development and application of new materials and products compatible with the environment. There is still no adequate and complete solution for the disposal of composite waste. Energy recovery (incineration) is one of the possible solutions, but fiber can not recover energy. It is possible to recycle the remains of fiber, but they have lower mechanical characteristics than the produced ones. Furthermore, the only economically justified recycling is for carbon fibers. One of the solutions would be to use natural reinforcements because they would burn along with the matrix. This paper describes some of the characteristics of natural reinforcements. Also described are organic polymers that can be used as resin in manufacturing of composites. The composite made of organic polymeric resin and natural reinforcement is called the green composite. Such compositions could be composted in special composts under certain conditions during which the process of composting would begin. Besides the description of natural reinforcements and natural matrix the properties of composites reinforced with linen fabric, were also explored and the properties of several samples of composites reinforced with glass and linen fiber combinations were compared. The purpose was to check the comparability of flax fibers with glass fibers.

Key words: linen, glass fibers, natural fibers, natural matrix

1. UVOD

Proizvodnja sirovina, materijala i proizvoda, njihova uporaba i odlaganje imaju značajan gospodarski i ekološki utjecaj. Iskoristivost sirovina i ekološka prihvatljivost može se povećati zatvaranjem kruga, tj. stvaranjem oporabljivog proizvoda, ali isto tako i korištenjem obnovljivih izvora sirovina. Zbog toga je upotreba prirodnih vlakana u kompozitima od velike važnosti. Prilikom razvoja bilo koje industrijske grane potrebno je imati na umu dugoročnu dostupnost sirovina. Kako bi se osigurala trajna opskrba prirodnim vlaknima i matricama, nužno je poticati razvoj poljoprivredne proizvodnje i zdravih ekosustava. Takva poljoprivreda označava ravnotežu između očuvanja prirodnih dobara i njihova korištenja, kako na lokalnom, tako i na globalnomu planu. To pretpostavlja trajni uzgoj biljaka s prirodnim vlaknima, skrb o korištenju poljoprivrednih dobara i očuvanje ekosustava. Prirodni materijali kao ojačala kod plastomera privukli su pažnju svojom niskom cijenom i ekološkom prihvatljivošću. Daljnji razvoj tih materijala i širenje njihova tržišta ovisit će o istraživanjima i poboljšanju njihovih preradbenih i uporabnih svojstava.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI OBNOVLJIVOG PORIJEKLA

Kompoziti su materijali dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Obično jedna faza (matrica) okružuje ostale faze (ojačala) [1].

Matrice mogu biti [1]: - metalne

- keramičke

- polimerne

Ojačalo može biti raspoređeno u obliku čestica, vlakna ili sloja unutar kompozita. Kada govorimo o materijalu vlakna kao ojačala ono može biti: - stakleno

- ugljično

- aramidno

- prirodno

Ukoliko je matrica ili ojačalo na prirodnoj osnovi riječ je kompozitima obnovljivog porijekla, a ako su i matrica i ojačalo prirodnog porijekla takav materijal se zove zeleni kompozit [2].

2.1. Prirodna ojačala

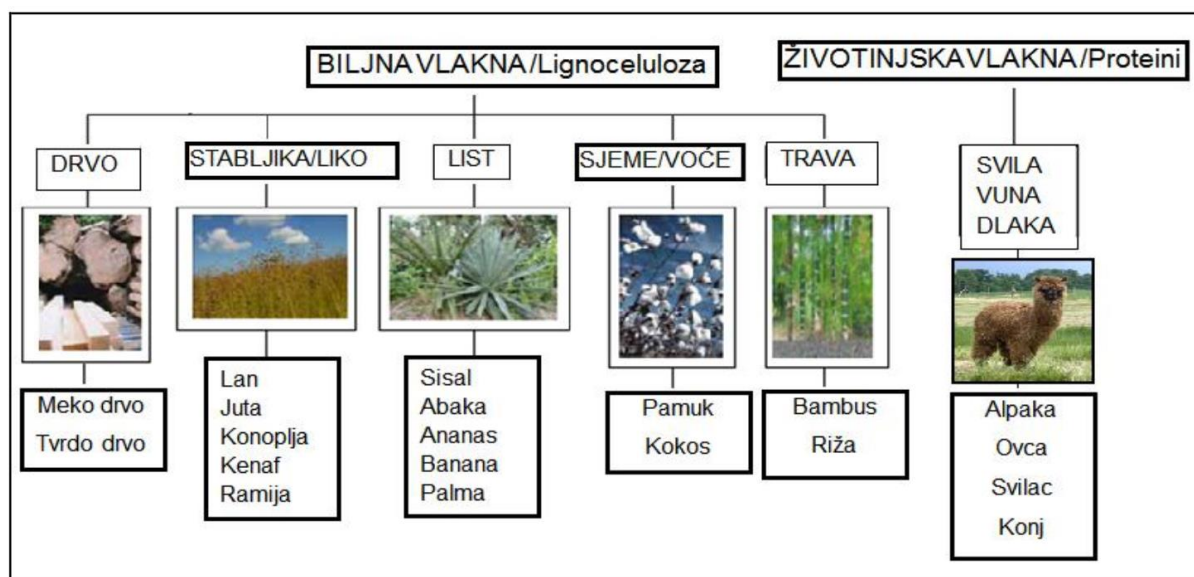
Prirodna vlakna mogu biti kao što je prikazano na slici 1 [3] :

Biljnog podrijetla:

- vlakna (drva, trave, slame itd.)
- lišće
- sjeme
- voće

Životinjskog podrijetla:

- vuna
- dlaka
- svila



Slika 1. Prirodna vlakna biljnog i životinjskog podrijetla [3]

Prirodna vlakna imaju niz prednosti [4]:

- dobivaju se iz obnovljivih izvora
- niske su gustoće
- nisu abrazivna
- lako se oporabljaju
- biorazgradiva su
- lako su dostupna u velikim količinama
- imaju dobra akustička i izolacijska svojstva
- mali je utrošak energije potreban za preradbu
- niske su cijene

Nedostaci [4]:

- niže temperature preradbe - granična temperatura razgradnje prirodnih vlakana je oko 200 °C
- higroskopnost
- teško raspršljivi u matrici
- osjetljiva su na truljenje/degradacije iz okruženja (mikroorganizmi, gljivice, itd.)
- dimenzije vlakana i mehanička svojstva variraju

2.1.1. Ojačala biljnog porijekla

2.1.1.1. Lanena vlakna

Lanena vlakna među najboljim su vlaknima dobivenima od biljaka (slika 2) koje rastu u umjerenom klimi. Iako im je povijest kulture duga 10 000 godina, kao sastavni dio modernih polimernih kompozita koriste se tek odnedavno. Biljka lana sastoji se od korijena, stabljike i grana koje nose kapsule sa sjemenjem.



Slika 2. Lan [5]

Za izradu lanenih vlakana pogodan je samo središnji dio stabljike, do 75 % visine biljke [3]. Vlakna se odlikuju čvrstoćom i fleksibilnošću te slabim istezanjem prilikom naprezanja. Ova su vlakna i elastična, ali samo za mala istezanja. Gustoća lanenih vlakana iznosi 1,5 g/cm³. Stanična stijenka sastoji se od celuloze (70 – 75 %), hemiceluloze (15 %), pektinske tvari (10 – 15 %), lignina (2 %) te voska (2 %) [6]. Do raspada vlakana dolazi pri temperaturama iznad 200°C. Lanena vlakna postojana su na razrijeđene slabe kiseline te lužnate otopine. Ne podnose vruće razrijeđene kiseline, hladne koncentrirane kiseline, a na suncu postupno gube čvrstoću. Lanena su vlakna skupa zbog brojnih koraka u proizvodnji koji zahtijevaju ljudski rad. Koriste se kao ojačavala za kompozite koji izgrađuju proizvode visoke vrijednosti gdje je potrebno podnijeti malo do srednje opterećenje. Posebno su pogodna za izradu dijelova unutrašnjosti automobila, npr. zamjenjuju staklena vlakna u kompozitima od kojih su građeni unutrašnji paneli vrata, pregradne police, nasloni sjedala, pokrov rezervne gume te ostale unutrašnje

presvlake. Odnedavno se velike svote ulažu u istraživanja vezana za primjenu kompozita ojačanih lanenim vlaknima (slika 3) u eksterijerima automobila [6].



Slika 3. Lanena vlakna [7]

2.1.1.2.Drvo

Drvo, odnosno drveni produkti - drveno brašno, piljevina, drvena vlakna osnovne su komponente drveno polimernih kompozita. Veličina i oblik drvene komponente presudno utječu na krajnja, uporabna svojstva kompozita. Drvena vlakna dobivaju se različitim metodama koje najčešće obuhvaćaju neku vrstu mehaničkoga ili kemijskog razdvajanja cjelovitog drva. Drvena vlakna dobro su punilo za drveno polimerne kompozite zbog velikog omjera njihova promjera i duljine zbog kojeg imaju visoku čvrstoću i mogućnost dobrog prijenosa naprezanja unutar drvom ispunjene polimerne matrice. Međutim, zbog tehnoloških problema izrade češće upotrebljavani oblik drvnog materijala jest drveno brašno. Drveno brašno (slika 4) je jeftin materijal i tehnološki je proces proizvodnje kompozita primjenom brašna kao punila jednostavniji. Drveno brašno može se dobiti i recikliranjem uporabljenih gotovih drvnih proizvoda. Od vrsta drva za proizvodnju drvnog brašna najčešće se upotrebljavaju bor, smreka, javor i hrast, no mogu se koristiti i ostale vrste. Svojstva drvnog brašna i/ili drvnih vlakana u mnogočemu su drugačija od svojstava cjelovitog drva od kojega su izrađeni. Najveće i najraznovrsnije tržište ovih kompozita je građevinarstvo (66% od ukupne svjetske proizvodnje), infrastruktura (18%) i industrija transportnih sredstava (10%) [8].

Prednosti drveno polimernih kompozita [9],[10]:

- koriste jeftine i lako nabavljive sirovine
- cijenom su konkurentni i drvu i polimerima
- lako se proizvode primjenom već postojećih tehnika proizvodnje
- proizvodi mogu biti raznoliki i veličinom i oblikom
- ne zahtijevaju površinsku zaštitu poput drva
- smanjena je cijena održavanja u odnosu na drvo
- mogu se spajati čavlima i obrađivati postupcima za obradbu drva

Nedostaci drveno polimernih kompozita [9],[10]:

- imaju veću gustoću od polimera i drva
- skuplji su od drva
- za proizvodnju je potrebna veća količina energije u odnosu na drvo
- niže su čvrstoće u odnosu na drvo



Slika 4. Lijevo drveno brašno, desno proizvodi ojačani drvnim brašnom [10]

2.1.1.3. Konoplja

Konoplja (slika 5) je vrlo zanimljiva biljka s agronomskoga gledišta. Za rast ne zahtijeva ništa ili zahtijeva vrlo malo herbicida, pesticida, fungicida i gnojiva. Karakterizira je brz rast, čime suzbija rast korova. Korisna je biljka za rotacijsku poljoprivredu jer obnavlja mineralni sastav tla. Ovisno o vrsti, 28 – 46 % biljke koristi se za dobivanje vlakana [6].



Slika 5. Konoplja [11]

Vlakna dostižu duljinu do 55 mm, postojana su na vodu, odlikuju se dobrom rasteznom čvrstoćom. Ova vlakna grublja su od lanenih i teško ih je izbijeliti. Čvršća su 20 % od lanenih vlakana, ali im je istezanje malo [6]. Vlakna od konoplje prikazana su na slici 6.



Slika 6. Vlakna od konoplje [11]

2.1.1.4. Curaua vlakna (Ananas)

Jedna od perspektivnijih biljaka za proizvodnju vlakana je curaua (lat. *Ananas erectifolius*). Vlakna te biljke pogodnih su svojstava i niske cijene, a za razliku od većine biljnih vlakana nemaju miris, što ih čini pogodnima za ugradnju u unutrašnjost automobila. Plastomerni kompoziti ojačani curaua vlaknima lako se oporabljaju spaljivanjem, što nije slučaj s kompozitima sa staklenim vlaknima. Iako programi reciklaže postoje, ekonomski je isplativo jedino recikliranje skupih ugljikovih vlakana [6]. Izgled curaura vlakana je prikazan na slici 7.

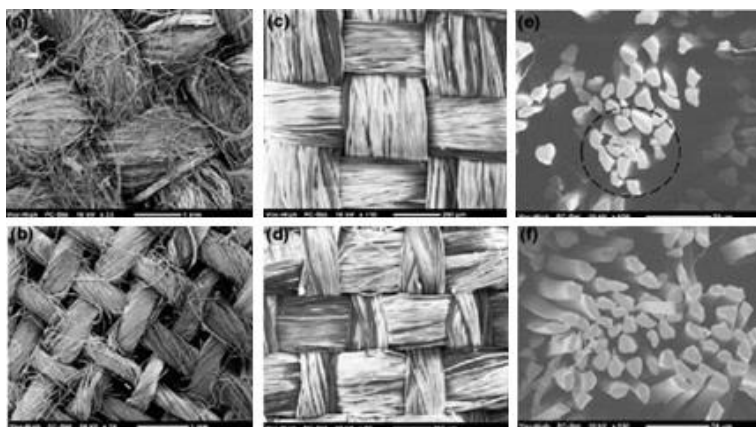


Slika 7. Curaua vlakna [12]

2.1.2. Ojačala životinjskog porijekla

2.1.2.1. Svila

Svila, tanko prirodno proteinsko vlakno koje proizvode gusjenice nekih leptira (svilci) pri izradbi čahure na prijelazu iz razvojnoga stadija ličinke u stadij mirujuće kukuljice, a prije preobrazbe u leptira. Dobiva se odmatanjem niti s čahure i jedino je prirodno filamentno vlakno, tj. vlakno velike duljine (više stotina metara). Najznačajnija je i najkvalitetnija svila od dudova svilca, koji se jedini od svilaca uzgaja radi dobivanja svile [13]. Svilena ojačanja su daleko više stlačiva od biljnih vlakana, pa čak i od staklenih vlakana. Svila za razliku od lana i konoplje ima duge, glatke pojedine niti koje mogu dostići duljinu i do 1500 mm. Imaju poprečni presjek gotovo trokutastog oblika, a takvi presjeci prijanjaju jedno uz drugo puno snažnije nego oni sa okruglim što je vidljivo na slici 8. Tkanine od svile bolje su od konoplje i lana za izradu kompozita, iz razloga što svila ima puno tanja i uređenija vlakna u samoj tkanini, bez sitnih niti koja se odvajaju od niti svile.

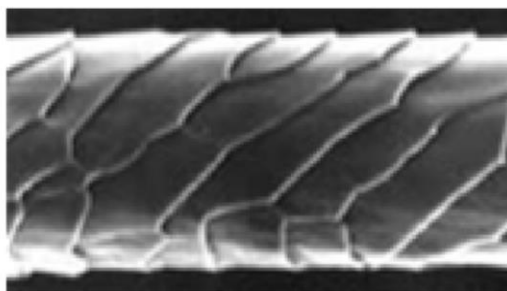


Slika 8. SEM slike za jednostavna tkanja tekstila (a)lan, (b)konoplja, (c) i (d)svila, (e) i (f) poprečni presjeci vlakana svile [14]

Kad je riječ o kompozitima to znači da je potreban manji tlak kako bi se postigao određeni volumenski udio vlakana. Za jednaku tlačnu silu volumenski udio svilenih vlakana je 10-15 % veći od najboljeg lanenog ojačala. Navedeno svojstvo bolje je i u usporedbi sa staklenim vlaknima. Osim toga, svilena vlakna mogu izdržati savojno opterećenje bez pucanja za razliku od biljnih vlakana što poboljšava mehanička svojstva kompozita. Ne samo da su svilena vlakna u skladu sa održivim razvojem jer je manje energije potrebno za proizvodnju takvih vlakana, već bi u ovoj namjeni mogle smanjiti uporabu staklenih vlakana štetnih za okoliš. U konačnici, kompoziti ojačani svilenim vlaknima mogli bi ponuditi odlična mehanička svojstva, osobito u primjenama gdje su potrebni lagani kompoziti visoke žilavosti [14].

2.1.2.2. Vuna

Vuna je vlakno građeno od bjelančevine keratina. Nadmolekularna struktura vrlo je složena, a i morfološka obilježja vlakna su specifična. Vanjska površina vlakna prekrivena je ljuskama (slika 9), što je glavni razlog sklonosti vune neželjenomu pustenju (pust- netkana plošna tekstilija od vune kojoj se cjelovitost postiže zamršivanjem vlakana). Oblik ljusaka i način njihova prekrivanja površine vlakna, a time i sklonost pustenju, može se znatno razlikovati, ovisno o finoći vlakna i pasmini ovce od koje vlakna potječu, iz čega proizlazi i razlika između fine i grube vune. Unutrašnjost vlakna sastoji se od vretenastih stanica koje tvore osnovnu vunenu supstanciju korteks; gruba vlakna u središtu mogu imati šupljinu, tzv. srž ili medulu. Vunena su vlakna najčešće blijedo-žućkaste boje, a samo neke pasmine ovaca daju sivu, crnu i smeđu vunu. Vlakna su više ili manje kovrčava i sjajna, što ovisi o pasmini i o finoći vlakna; fina je vuna zagasito sjajna, dok je sjaj grube vune nešto blještaviji. Duljina vlakna većinom je 5 do 15 cm, premda može biti i veća (do 38 cm), a i manja (do 3,5 cm), a debljina (promjer) vlakna od 12 μm kod vrlo finih do 70 μm kod vrlo grubih vlakana. U usporedbi s mnogim drugim tekstilnim vlaknima, čvrstoća vune je mala, pa se od nje proizvode nešto grublje pređe, kako bi se osigurala potrebna otpornost vunениh proizvoda na opterećenja tijekom uporabe. Međutim, vunena su vlakna razmjerno elastična i prije prekida se znatno produlje (30% do 60%) [15].



Slika 9. Uvećano vlakno vune [16]

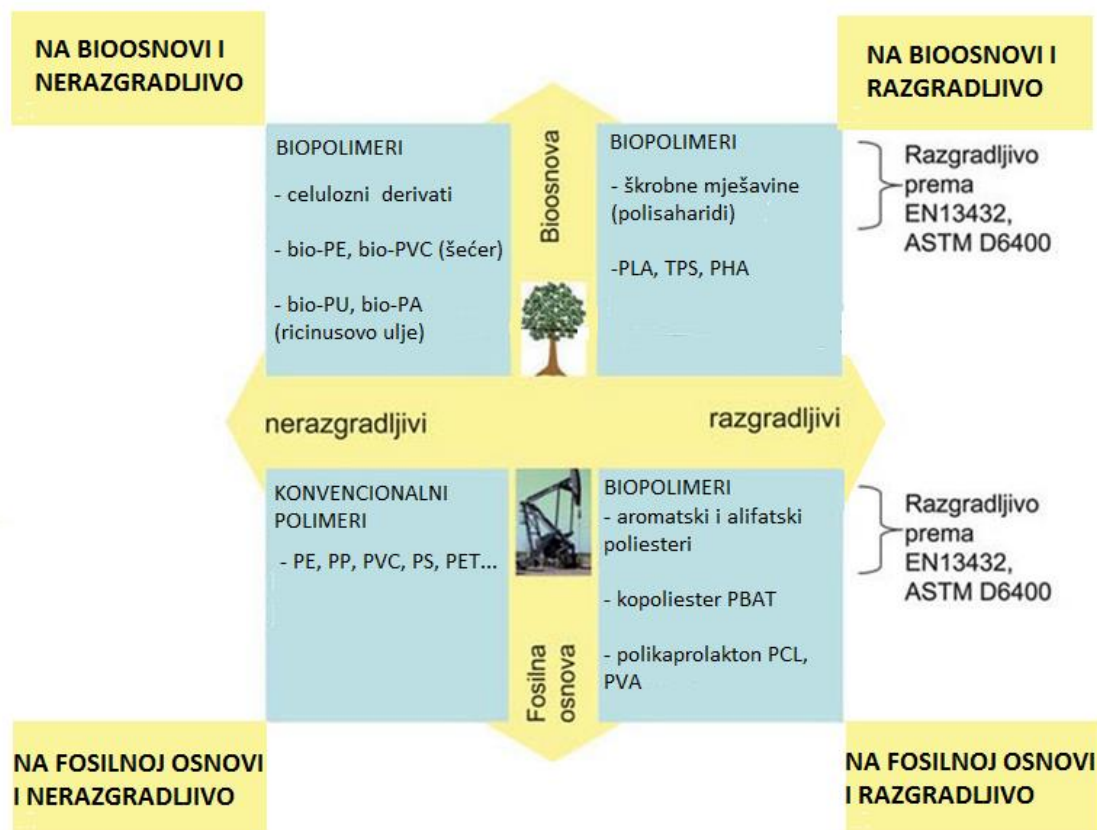
Zbog svoje heterogene strukture vunena vlakna su veoma porozna i reagiraju na promjenu vlažnosti. Vuna može apsorbirati vlagu u iznosu od oko 1/3 vlastite mase, za razliku od sintetičkih vlakana koja apsorbiraju samo 2-3% vlage [15].

Ovčja vuna je materijal koji se koristi za toplinsku i zvučnu izolaciju. Malo je literaturnih izvora koji pišu o vuni kao ojačalu za kompozite. Osnovna svojstva od kojih zavisi kvaliteta vune su: struktura površine, finoća, kovrčavost, jačina, produljenje i elastičnost, gustoća, higroskopnost, toplinska provodnost, dužina, otpornost na toplinu, insekte i dr. [15].

2.2. Prirodne matrice

Pod prirodnim matricama se podrazumijevaju bio-polimeri čije značajke omogućavaju da budu primjenjivani kao matrica u kompozitima. Poput sintetskih polimera i prirodni polimeri se rijetko upotrebljavaju u izvornom obliku, već se za određene primjene modificiraju ili im se dodaju različiti dodatci odnosno aditivi, kao što su punila pigmenti, stabilizatori omekšavala i kao takve smjese nazivaju se prirodni polimerni materijali. Aditivi iako prisutni u relativno malim koncentracijama, bitno poboljšavaju jedno ili više svojstava pa se tako dobivaju uporabljivi polimerni materijali. Neki prirodni polimeri već se prilikom izolacije dobivaju u modificiranom obliku. Većina prirodnih polimera biološki je razgradiva (biorazgradivi polimeri) tj. mogu se razgraditi djelovanjem mikroorganizama (bakterija, gljivica, algi) do ugljičnog dioksida i vode u aerobnim, odnosno do ugljičnog dioksida i metana u anaerobnom uvjetima u prihvatljivom vremenskom periodu (koji se razlikuje od polimera do polimera). Na brzinu razgradnje utječu faktori okoliša i značajke polimernog materijala (struktura, morfologija, kristaličnost, funkcionalnost, topljivost i molekularna masa). Neki sintetski polimeri također su biorazgradivi kao npr.: poli(e-kaprolakton) i poli(tetrametilenadipat-ko-tereftalat) [17].

Kada je riječ o bio-polimerima važno je razlikovati pojmove biorazgradivost i bioosnova. Biorazgradivost, odnosno kompostabilnost, svojstvo je materijala, a bioosnova, odnosno biomasa (materijal biološkog podrijetla), izvor je za osnovni sastojak bio-polimera. Biorazgradivost je povezana s kemijskom strukturom, a ne s podrijetlom osnovnog sastojka. Posljedica toga je da su i neki sintetski polimeri biorazgradivi [18]. Također je važno uočiti razliku između biorazgradivosti i kompostabilnosti. Kompostabilan materijal je takav materijal čijom se biorazgradnjom dobiva humus tj. ne otpušta nikakve štetne tvari kada bi se koristio za poboljšanje plodnosti zemlje. Na slici 10 prikazana je klasifikacija materijala ovisno o njihovoj razgradivosti, odnosno osnovi od koje su načinjeni. U prvu skupinu pripadaju materijali načinjeni na bioosnovi koji nisu bio-razgradljivi. Najčešće su to celulozni derivati, npr. celulozni acetat ili polietilen načinjen od etilena na bazi etanola dobivenoga od šećerne trske ili poliamid od ricinusova ulja. Drugu skupinu čine materijali na bioosnovi, npr. škrobne mješavine, odnosno materijali načinjeni od polisaharida kao što su kukuruz, krumpir ili pšenica, poliesteri načinjeni mikroorganizmima ili od biljaka kao što je poli(hidroksi-alkanoat) ili poliesteri od monomera načinjenih na bioosnovi, npr. polimeri mliječne kiseline (polilaktidi, PLA). Ti su materijali načinjeni od biomase i biorazgradivi su, odnosno kompostabilni.



Slika 10. Klasifikacija plastomernih materijala s obzirom na razgradljivost i osnovu od koje su načinjeni [19]

U sljedećoj su skupini materijali načinjeni od fosilnih goriva, dakle od nafte, prirodnog plina ili ugljena. U nju pripadaju aromatski i alifatski poliesteri, poli(vinil-alkohol), polikaprolakton te modificirani polimeri, npr. polietilen s dodatcima koji iniciraju razgradnju. Ti su materijali biorazgradivi, ali nisu na bioosnovi. I napokon, posljednju skupinu čine uobičajeni polimerni materijali.

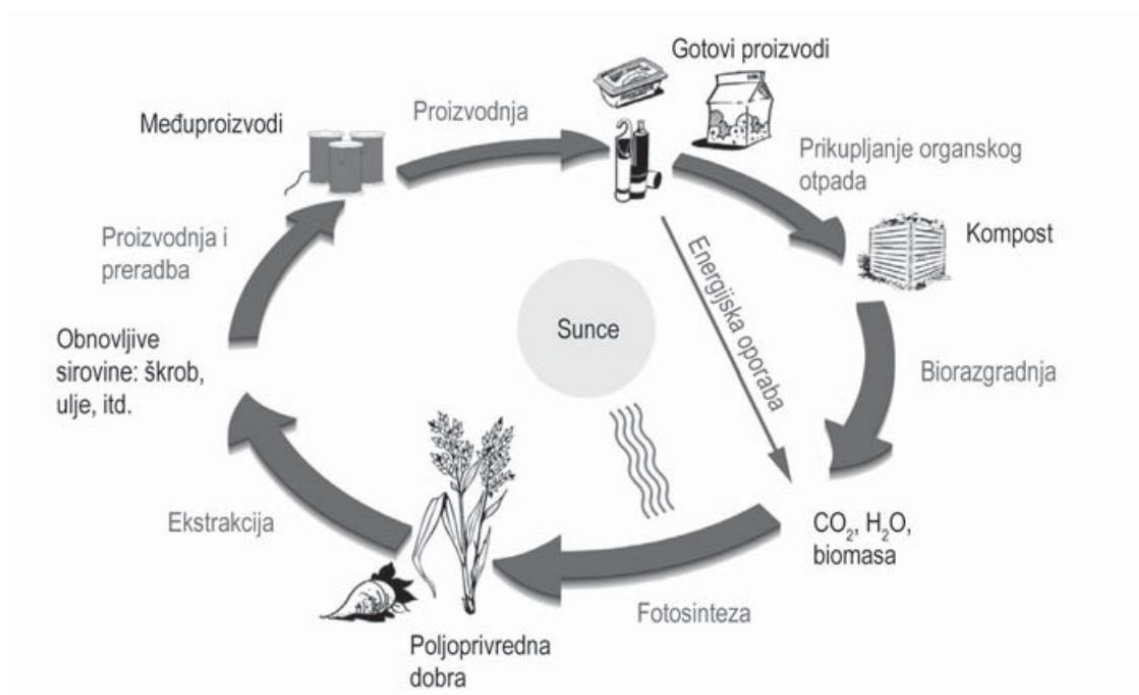
Pojam kompostabilnih polimera podrazumijeva materijal koji se razgrađuje djelovanjem bioloških procesa tijekom kompostiranja (procesa koji kontrolira biološku razgradnju biorazgradivog materijala u tvar nalik na humus – kompost). Kompostabilni polimeri su nakon biološke razgradnje vizualno nezamjetljivi, a raspadaju se na ugljikov dioksid, vodu, anorganske komponente i biomasu, bez otrovnih tragova. Brzina kompostiranja jednaka je kao kod poznatih materijala poput celuloze. Da bi polimer bio pogodna za kompostiranje, mora zadovoljiti tri kriterija:

1. biorazgradnja - mora se razgraditi na ugljikov dioksid, vodu, biomasu istom brzinom kao celuloza (papir)
2. dezintegracija (raspadanje u djeliće) - razgrađeni materijal ne smije se razlikovati od ostalog komposta
3. netoksičnost - kompostiranjem ne smije nastati nikakav toksični materijal, a nastali se kompost smije koristiti kao gnojivo.

Smatra se da se biorazgradivi materijali u potpunosti razgrađuju na odlagalištu, a time se smanjuje ukupna količina otpada. No otpad je na odlagalištu sabijen i zarobljen pod zemljom, dotok kisika i vlage koji su nužni za mikrobiološku razgradnju biorazgradivog materijala je smanjen, pa se takvi materijali na odlagalištu ne mogu razgraditi u željenom roku. Prema europskoj normi EN 13432, materijal se treba u potpunosti razgraditi u roku od 90 dana. No razgradnja na odlagalištu može trajati i godinama, a može uzrokovati i probleme, npr. s procjednim vodama. Jednako tako treba imati na umu i problem miješanja biorazgradivog otpada s odvojenim polimernim otpadom koji je u sustavu recikliranja [20].

Kompostabilnost proizvoda može pružiti dodatnu prednost, posebno u sušnim područjima koja imaju manjak humusa, budući da omogućuje proizvodnju komposta koji se može upotrijebiti kao gnojivo i supstrat radi poboljšanja kvalitete tla. Treba, međutim, imati na umu da biorazgradivi, odnosno kompostabilni materijali nisu namijenjeni odlaganju u prirodu, već u posebna postrojenja za kompostiranje [21].

Odlagališnog prostora sve je manje, pa odlaganje otpada na odlagališta u mnogim zemljama Europske unije više nije dopušteno. Proizvodi moraju biti proizvedeni i primjenjivani uz štednju resursa, a nakon završenoga životnog vijeka moraju se oporabiti. Stoga se pitanje gospodarenja proizvodima nakon kraja uporabnog vijeka postavlja već tijekom njihova razvoja. Ako se za proizvodnju rabe materijali kojima je lako gospodariti, tada su troškovi gospodarenja, a time i sveukupni troškovi proizvoda niži. Bio-polimer je razvijen u skladu s tim smjernicama, prema kojima se kompostiranje smatra najjeftinijim postupkom oporabe. Godišnje se od biljaka, koristeći se sunčevom svjetlošću i fotosintezom, proizvede oko 100 milijarda tona biomase. Ista količina biološki se razgradi u izvorne materijale, CO₂ i vodu, te manje količine biomase i minerala, primarno uz pomoć brojnih mikroba. Cilj bio-polimerne industrije je imitiranje toga zatvorenog sustava (slika 11) jer se time smanjuju emisije CO₂ koje štete okolišu te čuvaju fosilni izvori za buduće generacije.



Slika 11. Idealni zatvoreni životni ciklus biorazgradivih proizvoda [21]

Samo određene vrste bio-polimernih materijala mogu se kompostirati. Mikrobi, kao što su bakterije ili gljivice, svojim enzimima probavljaju polimerne lance koji im služe kao izvor hrane. Krajnji proizvod su voda, CO_2 i biomasa. Kemijska struktura polimera, posebno vrsta veze, određuje mogu li, odnosno u kojoj mjeri mikrobi u određenom vremenu razgraditi materijal. Brzina biorazgradnje ovisi o:

- temperaturi (50 - 70 °C tipičan je temperaturni raspon u industrijskim postrojenjima za kompostiranje)
- vlažnosti – voda je nužna za proces biorazgradnje
- broju i vrsti mikroba.

Samo ako su zadovoljena sva tri uvjeta, razgradnja će se odvijati brzo. U kućnim kompostanama razgradnja će se odvijati vrlo sporo u usporedbi s industrijskim kompostiranjem, a u slučaju neispunjenja jednoga od navedena tri uvjeta, razgradnja se gotovo potpuno zaustavlja. U industrijskim postrojenjima za kompostiranje biopolimerni proizvodi pretvaraju se u biomasu, vodu i CO_2 unutar 6 do 12 tjedana. Takva postrojenja danas postoje u mnogim zemljama i regijama Europske unije, npr. u Njemačkoj, Nizozemskoj, Skandinaviji, Belgiji i Italiji [21].

2.2.1. Bio-polimeri na škrobnoj osnovi

Škrob je ugljikohidrat, biljni polisaharid, kojeg proizvode biljke i upotrebljavaju ga kao oblik pohrane energije. Pohranjuju ga unutar stanica, u obliku sferičnih granula (tzv. škrobna zrna). Glikozidna veza povezuje monomerne glukozne jedinice, koje grade amilozu i amilopektin, dvije različite molekule škroba. Amilopektina ima više u škrobnom zrnu (70 – 90%) nego amiloze (10 – 30%). Najviše komercijalno dostupnog škroba dobiveno je iz kukuruza (79%), krumpira (9%), pšenice (7%), riže i ječma (slika 12). Te biljke sadrže veliku količinu škroba, navodno od 60 do 90% suhe mase.



Slika 12. Biljke iz kojih se dobiva škrob [22]

Škrob se prilikom procesa kompostiranja vrlo brzo biološki razgradi. Žilavost i vodootpornost škroba slabija su u odnosu na većinu polimera koji su dobiveni iz nafte, te se zbog toga traže rješenja ovog problema. Bolje se karakteristike dobivaju ako se škrob miješa s bolje vodootpornim polimerima ili ako ga se kemijski modificira. Glavni sastav škrobnog polimera je škrob čija je struktura blago promijenjena (restrukturirani škrob). Škrob se može restrukturirati uz pomoć energije i topline. Time je moguće potpuno razbiti kristalnu strukturu. Restrukturirani škrob ponaša se kao plastomer koji se lako obrađuje poput polimernog materijala. Ukoliko se koristi u prirodnom obliku, preosjetljiv je na vlagu. Plastomeri na osnovi škroba predstavljaju jedan od razreda biorazgradivih materijala koji imaju najveći kratkoročni potencijal i omogućuju razvoj potpuno razgradivih proizvoda za specifičnu uporabu.

Plastomerni škrobni kompoziti mogu imati sadržaj škroba do 50%. Filmovi na osnovi škroba, koje je moguće pronaći na tržištu, uglavnom su izrađeni iz škroba pomiješanog s plastomernim poliesterima s namjerom dobivanja biorazgradivog i kompostabilnog proizvoda. Kada se takvi filmovi upotrebljavaju za proizvodnju vreća za recikliranje organskog otpada, ambalažu, higijenskih proizvoda te u poljoprivredi, onda su svojstva takvih filmova slična svojstvima PE - LD [22,23]. Relativno niska čvrstoća usporediva sa čvrstoćom polipropilena ili polietilena onemogućuje korištenje za elemente od kojih se zahtijevaju visoka mehanička svojstva. Zbog toga se takve smole kombiniraju sa čvrstim prirodnim vlaknima kao što su konoplja, vlakna ananasa, bambusa isl. Fizikalna svojstva bio-matrice na bazi škroba su prikazana u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba fizikalnih svojstava nekih biopolimera [24]

BIO-POLIMERI	T _g [°C]	T _m [°C]	R _m [MPa]	E [MPa]	A [%]
Škrobni biopolimer	-	110-115	35-80	600-850	580-820
Celulozni biopolimer	-	-	55-120	3000-5000	18-55
PLA	40-70	130-180	48-53	3500	30-240
PHA	-30-10	70-170	18-24	700-1800	3-25
PHB	0	140-180	25-40	3500	5-8

2.2.2. Biopolimeri na celuloznoj osnovi

Celuloza je, kao i škrob, ugljikohidrat. Količinski je celuloza najzastupljeniji polimer na Zemlji te je glavna potpora drveću i drugim biljkama (pamuk, lan, juta, šećerna trska, žitarice...). Osim viših biljaka celulozu sintetiziraju i octeno - kiselinske bakterije. Octeno - kiselinske bakterije mogu sintetizirati skoro čistu celulozu s istim kemijskim i fizikalnim svojstvima kao što ih ima celuloza u biljkama. Celuloza se sastoji od linearnih lanaca međusobno povezanih od nekoliko stotina do više desetaka tisuća glukoznih jedinica, koje su, kao i kod škroba, međusobno povezane s glikozidnom vezom. Iako škrob i celuloza imaju istu monomernu jedinicu, njihovi polimerni lanci razlikuju se u smještaju glukoznih jedinica. Glavni izvor celuloze za industrijske procese su drvo i pamuk prikazan na slici 13.



Slika 13. Plantaža pamuka [25]

Celuloza je glavni sastojak papira, kartona, ljepenke i tekstila, napravljenog od pamuka, lana ili drugih biljnih vlakana. Upotrebljava se također za proizvodnju vlakana, filmova i celuloznih derivata. Zapravo su prvi industrijski polimeri (celuloid, celofan) utemeljeni na celulozi. Mehanička svojstva polimera na bazi celuloze vidljiva su u tablici 1. Unatoč tome, područje materijala na bazi celuloze još do danas nije do kraja istraženo. Uključivanjem celuloznih vlakana u bio-polimerne materijale dobiju se proizvodi koji imaju važne značajke za iskorištavanje jednom kad postanu otpad (kompostiranje kao alternativa odlaganju na odlagalištima). Celulozna vlakna se upotrebljavaju kao ojačalo za biorazgradive polimerne kompozite s namjerom da se poboljšaju mehanička svojstva i hidrofobnost. Vlakna celuloze miješaju se i sa škrobom, tako se postižu bolja mehanička svojstva, propusnost za plinove i vodootpornost [22,23].

2.2.3. Biopolimeri na bazi soje

1940 - ih je bilo mnogo istraživanja o polimerima na osnovi soje. Tada se sojin protein najviše upotrebljavao kao punilo, što je snizilo cijenu polimerna dobivenih iz nafte. Danas se još uvijek upotrebljava, ali s namjerom veće biološke razgradivosti polimera. U usporedbi s polimerima iz kazeina, zeina i glicina, sojin protein je i ekonomski konkurentan. Soja (slika 14) je bogata uljima i proteinima, a suha masa sadrži približno 40% proteina i 20% ulja. Sojin protein je globularan, reaktivan i često topiv u vodi. Približno 98% proteina u soji pohranjeno je u staničnom organelu. Odvajanje sojinog proteina najčešće se očituje u promjeni fizikalnog stanja, a ponekad dolazi i do kemijske reakcije.



Slika 14. Soja [26]

Rezultati istraživanja pokazuju da je sojin protein, sam ili pomiješan sa škrobom, primjeren za proizvodnju polimernih proizvoda, kao što su ambalaža, igračke, sportska oprema i posuđe. Ubrizgavani polimeri pokazuju dobra mehanička i vodootporna svojstva. Na kraju životnog vijeka, ti se proizvodi sakupljaju i recikliraju čime se smanjuje teret za okoliš. Filmovi iz sojinih proteina pokazuju dobra svojstva kao zaštita od prodora UV - zračenja te prodora kisika. Upotrebljavaju se za folije u poljoprivredi, koje nakon upotrebe nije potrebno odstranjivati s poljoprivrednog gospodarstva jer se same razgrade. Ukoliko se pravilno odvajaju, od sojinih proteina mogu se dobiti pjenasti proizvodi različitih gustoća i kao takvi se mogu koristiti kao izolacijski materijali s različitim toplinskim svojstvima. [22]. Smola od soje dobro prigušuje buku i vibraciju. U nastavku je prikazana tablica 2 u kojoj su prikazana mehanička svojstva

epoksidne sole, poliesterske smole i smole na bazi soje ojačanih staklenim vlaknima. U provedenoj studiji kompozit sa matricom na bazi soje je pokazao najbolje rezultate.

Tablica 2. Svojstva kompozita sa različitim matricama ojačanih 181-G staklom [27]

Matrica ojačana staklenim vlaknom	ρ [g/mm³]	w [%]	T_g [°C]	R_m [MPa]	E_{ms} [MPa]	R_{ms} [MPa]
Smola na bazi soje	0.00190	25	102	350	16640	420
Poliesterska smola	0,00191	26	127	326	14117	334
Epoksidna smola	0,00183	28	97	324	16260	470

2.2.4. Poliesteri polilaktičke kiseline (PLA)

Od alifatskih poliestera, polilaktička kiselina, PLA, najviše prirastezi pažnju. Otkrio ju je 1932. godine Carothers da bi se vrlo brzo, početkom 1960 - ih počela smatrati velikim potencijalom kao biorazgradiva smola za medicinske svrhe. Dobiva se iz obnovljivih prirodnih izvora, šećera (dekstroze, glukoze i saharoze), šećerne repe, melase ili iz škroba dobivenog iz kukuruza, pšenice i riže. Postoje dvije metode polimerizacije polilaktičke kiseline: polimerizacija polilaktičke kiseline kao monomer u otopini i polimerizacija iz cikličkog dimera (laktida). Polimeri na osnovi mliječne kiseline su u prošlosti imali najveće značenje u području medicinske primjene. Pored upotrebe u medicini, ova grupa polimera danas se sve više koristi kao materijal za tehničke primjene zbog svoje čvrstoće. Kombinacija vrlo pogodnih fizičkih svojstava kao što su transparentnost i biorazgradivost čine polilaktičku kiselinu pogodnom i za upotrebu kao što je pakiranje. Ovi biorazgradivi polimeri mogu ponuditi rješenja za ekološke probleme s otpadom koji nije biorazgradiv. Nažalost, žilavost i toplinska svojstva nisu dovoljno dobra za pojedine primjene [28]. PLA se uspješnim pokazao i kao matrica kompozita. Svojstva smole namjenjene za izradu kompozita je prikazana u tablici 1.

2.2.5. Poli(hidroksialkanoati) (PHA)

Polihidroksialkanoati su linearni poliesteri proizvedeni bakterijskom fermentacijom ugljikohidrata ili lipida. Više od 150 monomera može biti u sastavu PHA. Ovaj polimer je biorazgradiv i koristi se u različite svrhe. Može biti plastomerni, ali i elastomerni materijal, čija točka taljenja varira, ali se najčešće kreće od 40 do 180 °C. Mehanička i druga svojstva PHA mogu se mijenjati tako da se pomiješaju s drugim polimerima, enzimima ili organskim materijama. Da bi se PHA proizvela, kultura mikroorganizama poput *Bacillus subtilis* se stavlja na hranjivu podlogu s visokim udjelom nutrijenata uključujući ugljikohidrate, mineralne materije, peptone i lipide. Nakon što kultura bakterija dostigne stacionarnu fazu, stimulira se proizvodnja PHA, pri čemu oni mogu činiti i do 80% bakterijske mase. Proizvodnja PHA se najčešće događa zbog nedostatka nekog nutrijenta, poput fosfora, dušika, kisika i slično. Polimeri se zatim sintetiziraju i pohranjuju u krupne granule u ćeliji. Ti polimeri su zaista raznoliki. PHA sintetaza je ključni enzim za produkciju PHA. Kao supstrat služe tioesteri ili masne kiseline. S obzirom da postoje dvije vrste PHA sintetaza, mogu se razlikovati i dva krajnja produkta. To su: PHA koji se također dobiva od masnih kiselina s tri do pet ugljikovih atoma, te PHA koji se također dobiva od masnih kiselina, ali s nešto dužim lancima, jer sadrži od šest do četrnaest atoma ugljika. PHA se koristi u produkciji ortopedskih pomagala, umjetnih kukova i ligamenata, patela, pa čak i štapova i proteza. Osim navedenog, upotrebljavaju se i kao učvršćivači u kozmetičkim proizvodima, za higijenske proizvode, kao ambalažni materijal i stalak loptice za golf. PHA polimer je u usporedbi s drugim vrstama bio-polimera (npr. PLA) UV - stabilan, podnosi temperature do 180 °C i slabo propušta vodu [29]. Mehanička svojstva PHA u usporedbi sa drugim bio-polimerima prikazani su u tablici 1.

2.2.6. *Poli(3 - hidroksibutirat) (PHB) Poli(3 - hidroksibutirat)*

(PHB) je potpuno biorazgradljiv alifatski poliestar koji spada u skupinu poli(hidroksialkanoata) i jedini se iz te skupine bio-polimera industrijski proizvodi u većim količinama. U prirodi ga sintetizira više od 75 vrsta različitih mikroorganizama kojima služi za pohranu energije i/ili ugljika. PHB se akumulira unutar stanica u obliku bijelih granula. Industrijski se proizvodi procesom bakterijske fermentacije, a kao supstrati (izvori ugljika) koriste se ugljikohidrati (glukoza i saharoza) iz poljoprivrednih kultura kao što su šećerna repa, šećerna trska ili kukuruz, ali i iz poljoprivrednog otpada, te nusproizvoda prehrambene industrije kao što su melasa i sirutka. Bakterija koja se najčešće koristi za sintezu PHB - a je *Rastolnia eutropha* zbog jednostavnog procesa sinteze i činjenice da akumulira velike količine PHB - a unutar stanica (oko 80% mase stanice). U novije vrijeme se sve više koriste genetski modificirane bakterije, posebno *Escherichia coli*. Na kraju procesa proizvodnje PHB se izolira iz mikroorganizama ekstrakcijom pogodnim otapalom ili pomoću enzima koji razore staničnu stjenku mikroorganizama pri 37 °C. Staklište PHB - a je pri 1 - 9 °C. Talište mu iznosi $170 \pm 5^\circ\text{C}$, pa bi temperatura preradbe trebala biti oko 190 °C. Međutim, pri tim temperaturama brzina toplinske razgradnje PHB-a je toliko velika da je dopušteno vrijeme zadržavanja na temperaturi preradbe svega nekoliko minuta, što je jedan od glavnih razloga zašto PHB još ne nalazi širu komercijalnu primjenu. PHB pokazuje izvrsnu otpornost prema O_2 i CO_2 , a nešto slabiju prema vodenoj pari u odnosu na konvencionalne polimere. Izrazito je hidrofoban i neosjetljiv prema vlazi što ga razlikuje od ostalih biorazgradivih polimera, koji su ili topljivi u vodi ili osjetljivi na vlagu. PHB trenutno nalazi najveću primjenu u medicini gdje se koristi kao biorazgradivi nosač (matrica) za lijekove. Budući da je kompatibilan s ljudskom krvlju i tkivom, a njegov monomer je metabolit prisutan u krvi svih viših životinja, pa i u ljudskoj, PHB se može koristiti u rekonstrukcijskoj kirurgiji kao zamjena dijelova kostiju, zatim za fiksiranje kostiju i zglobova (vijci, šipke), kao kirurški konac itd. Najzanimljivije potencijalno područje primjene PHB-a s motrišta zaštite okoliša su proizvodi za kratkotrajnu i/ili jednokratnu uporabu (folije, vrećice, boce, pelene, britvice) [29]. Mehanička svojstva prikazana su u tablici 1.

2.2.7. Ostali biorazgradivi polimeri

Postoji veliki broj različitih biorazgradivih polimera i njihovih kopolimera: polikaprolakton (PLC), poliglikolid (PGL), poli(laktid-ko-glikolid), polialkil-2-cianoakrilat, poli(ϵ -kaprolakton), glikol(trimetilenkarbonat), poli- l-laktid(dl - lakti d), polilaktid(δ - valerolakton), poli- β -hidroksibutarat, poli- β -maleinska kiselina, poli-p-dioksanon, poli(amino kiseline), polivinilalkoh ol, itd. Radi poboljšavanja bio kompatibilnosti, monomeri za dobivanje biorazgradivih polimera se kopolimeriziraju s monomerima biorazgradivih polimera. Ostali biorazgradivi polimeri mogu imati široku upotrebu u tehnologijama tankih slojeva i prevlaka. Oblaganjem različitih supstrata u potpunosti se mijenja njihova funkcionalnost kao i bio kompatibilnost. Mogu se koristiti u zdravstvu za izradu stentova te kirurških konaca. Unutar polimera može se ugraditi lijek koji se tijekom biorazgradnje polimera oslobađa. Nedostatak im je što su relativno skupi [29].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio se sastoji od opisa izrade uzoraka kompozita ojačanih staklenim i lanenim vlaknima u različitim kombinacijama.

Uzorak 1. Kompozit ojačan s dva sloja lanene tkanine

Uzorak 2. Kompozit ojačan s četiri sloja staklene tkanine

Uzorak 3. Kompozit ojačan s dva sloja staklene tkanine

Uzorak 4. Kompozit ojačan s jednim slojem staklene tkanine i jednim slojem lanene tkanine

Uzorak 5. Kompozit ojačan s dva sloja staklene tkanine i jednim slojem lanene tkanine

Osnovni podaci o lanenim i staklenim tkaninama prikazani su u tablici 3 i tablici 4.

Tablica 3. Lanena tkanina

Tkanina lana-redni broj	m [g]	h [mm]	$b_{tkanine}$ [mm]	l [mm]
1.	18,3	1,21	220	220
2.	19,8	1,40	220	220
3.	18,4	1,23	220	220
4.	17,4	1,18	220	220

Tablica 4. Staklena tkanina

Tkanina stakla-redni broj	m [g]	h [mm]	$b_{tkanine}$ [mm]	l [mm]
1.	14,00	0,33	220	220
2.	14,08	0,34	220	220
3.	15,17	0,34	220	220
4.	14,00	0,33	220	220
5.	14,00	0,33	220	220
6.	14,33	0,34	220	220
7.	13,95	0,33	220	220
8.	14,22	0,34	220	220
9.	14,21	0,34	220	220

Prilikom izrade kompozita korištena je poliesterska matrica POLIPOL 3401-TA-H-17 proizvođača Polya. Svojstva matrice prikazana su u tablici 5.

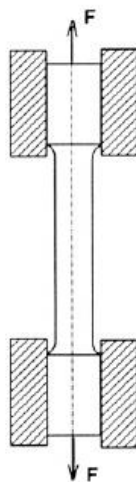
Tablica 5. Svojstva POLIPOL 3401-TA-H-17 [30]

ρ [g/mm ³]	R_m [MPa]	E [MPa]	R_{ms} [MPa]	E_s [MPa]	A [%]
0,001128	68	3557	117	4013	2

Nakon izrade uzoraka izrezane su epruvete za ispitivanja mehaničkih svojstava. Osnovne formule i teoretski opis ispitivanja opisane su u nastavku.

3.0.1. Rastezna čvrstoća

U uvjetima normalnoga jednoosnog rasteznog statičkog naprezanja, osnovna mehanička svojstva utvrđuju se statičkim rasteznim pokusom. Ispitivanje se provodi na kidalicama ili univerzalnim ispitivalicama na kojima se epruvete kontinuirano rastežno opterećuju do loma kao što je prikazano na slici 15 [31]. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete. Dimenzije epruveta određene su u skladu s normom HRN EN ISO 527-4:2008.



Slika 15. Način opterećivanja epruvete pri statičkom rasteznom ispitivanju [32]

Ispitna epruveta opteretila se silom i za svaku ispitnu epruvetu očitano je odgovarajuće produljenje za sile opterećenja. U trenutku loma epruvete, očitana je maksimalna sila. Od svakog uzorka ispitano je 5 epruveta, a dobiveni rezultati uvršteni su u tablice, te iskorišteni za izračun rastezne čvrstoće i modula elastičnosti.

Rastezna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0}$$

gdje je:

R_m – rastezna čvrstoća, MPa

F_{max} – maksimalna sila opterećenja, N

S_0 – površina početnog presjeka, mm²

Modul elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

gdje je:

E – modul elastičnosti, MPa

σ – naprezanje, MPa

ε – produljenje, mm/mm

Vrijednost istezanja nakon loma epruvete određuje se izrazom:

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}$$

gdje je:

ΔL_u – produljenje, mm

L_0 – početna duljina epruvete, mm

Aritmetička sredina je suma svih vrijednosti (npr. rezultata mjerenja) podijeljena s brojem vrijednosti [33].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

gdje je:

x_i – rezultat mjerenja

n – broj mjerenja (rezultata mjerenja)

Procijenjena standardna devijacija mjera je za prosječno odstupanje svakog podatka od aritmetičke sredine [33].

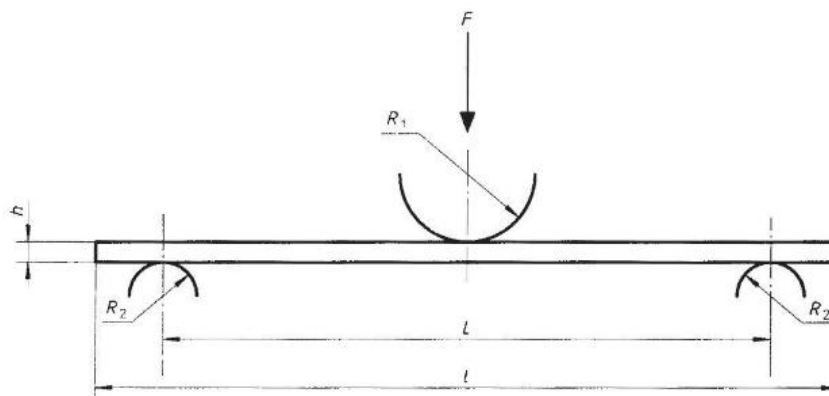
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

gdje je:

S – standardna devijacija

3.0.2. Savojna čvrstoća

Epruvete za ispitivanje mogu biti okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka, a sam oblik i dimenzije epruvete ovise o vrsti materijala koji se ispituje. Za ispitivanje je korištena epruveta pravokutnog poprečnog presjeka, a radi se o tro-točkastom ispitivanju (slika 16). Epruveta se opterećuje u sredini raspona savojnom silom F_s , stoga je na tom mjestu maksimalni savojni moment M_{smax} . Epruveta se opterećuje sve do loma pri prekidnoj sili, a za svaki je uzorak mjeren odgovarajući progib za sile opterećenja [31]. Ispitivanje savojne čvrstoće se provodi tako da se epruveta postavi na dva oslonca te se po sredini epruvete vrši pritisak posmakom opterećenog elementa prema epruveti. Postupak se provodi do konačnog pucanja epruvete, a kao izlazni podatak se dobiva ovisnost sile kojom se na epruvetu djeluje o progibu opterećenog dijela epruvete, tj. posmaku opterećenog elementa.



Slika 16. Shema ispitivanja savojne čvrstoće [34]

Za vrijednost savojene čvrstoće vrijedi izraz :

$$R_{ms} = \frac{3 \cdot F_p \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

gdje je:

R_{ms} – savojna čvrstoća, MPa

F_p – prekidna sila, N

L – razmak između oslonaca, mm

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm

Savojni modul elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E_s = \frac{\Delta F}{\Delta f} \cdot \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3}$$

gdje je:

$$\frac{\Delta F}{\Delta f} = \operatorname{tg} \alpha$$

$\operatorname{tg} \alpha$ – nagib pravca

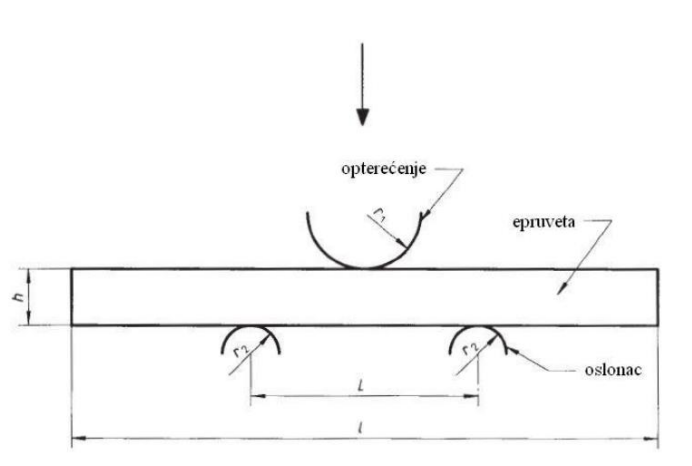
Prema normi HRN EN ISO 14125:2005/A1:2011 ispitano je po pet epruveta svakog uzorka.

Progibi pod opterećenjem su očitavani u razmaku opterećenja 20 N.

3.0.3. Međuslojna čvrstoća

Mjera za kvalitetu granične površine, odnosno međusloja, jest međuslojna smična čvrstoća. Ona ovisi o čvrstoći prijanjanja između vlakna za ojačanje i osnove te o veličini dodirnih površina vlakana i adhezije na tim površinama. Razumljivo je da je dobra adhezija potrebna duž cijele granične površine vlakana za ojačanje i osnove, upravo zato da bi se što veće opterećenje moglo prenijeti s polimerne osnove na vlakna za ojačanje. Istraživanje granične površine vlakno - osnova i međusloja između ta dva gradbena materijala vlaknima ojačanog kompozita iznimno je važno za njihovo što čvršće povezivanje, a to izravno utječe na svojstva

vlaknima ojačanih kompozita. Time se povećava mogućnost njihova mehaničkog opterećenja i novih konstrukcijskih rješenja u praksi [34]. Ispitivanja međuslojne smične čvrstoće provedena su sukladno normi EN ISO 1 4130 : 1997 . Norma propisuje izradu epruveta pravokutnog poprečnog presjeka. Epruveta se opterećuje tro-točkastim savijanjem, ali s malim razmakom oslonaca (slika 17).



Slika 17. Shema ispitivanja međuslojne čvrstoće[34]

Ispitivanja međuslojne smične čvrstoće provodi se na kidalici ili univerzalnoj ispitivalici. Omjer debljine uzorka i razmaka među osloncima mora biti mali kako bi se povećao udio smičnih naprezanja i time potaknuo lom na dodirnoj površini između ojačala i matrice.

Međuslojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_p}{4 \cdot b \cdot h}$$

gdje je:

τ – međuslojna čvrstoća, MPa

F_p – prekidna sila, N

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm

3.0.4. Tvrdoća

Tvrdoća je svojstvo materijala koje se protivi prodiranju stranog tijela u njegovu strukturu (ili površinu). Podaci o tvrdoći materijala su neophodni kada se radi o ručnoj ili strojnoj obradi. Ispitivanje tvrdoće može se svrstati u nerazorna ispitivanja iz razloga što se površina ispitivanog tijela neznatno oštećuje. Tvrdoća je mjerena sukladno normi EN ISO 2039 - 1 utiskivanjem kuglice promjera 5 mm, te opterećenjem od 13,45 kp, odnosno 132 N. Na uređaju je očitana dubina prodiranja kuglice nakon 10, 30 i 60 sekundi.

$$H = \frac{1}{\pi \cdot D} \cdot \frac{F}{h_k} = 0,064 \cdot \frac{F}{h}$$

gdje je:

H - tvrdoća, MPa

D – promjer kuglice, mm

F – sila opterećenja, N

h_k – dubina prodiranja, mm

3.0.5. Udarne žilavost

Udarne žilavost je svojstvo koje pokazuje kolika je otpornost materijala na udarac. Ovo svojstvo je važno za dijelove koji su opterećeni na udarne opterećenja. Ispitivanje udarne žilavosti materijala obavlja se pomoću Charpy-evog bata. Samo ispitivanje provodi se na način da se epruveta stavi u oslonac, te se s određene visine spušta bat da slobodnim padom lomi epruvetu. Količina kinetičke energije utrošene za lom epruvete naziva se udarni rad loma ili udarna žilavost [34]. Ispitivanje udarne žilavosti provedeno je sukladno normi HRN EN ISO 179 – 1:2010.

Udarni rad loma (udarna žilavost) računa se prema izrazu:

$$A_{cu} = \frac{E_c}{b \cdot h} \cdot 10^3$$

gdje je:

A_{cu} - udarna žilavost, kJ/m²

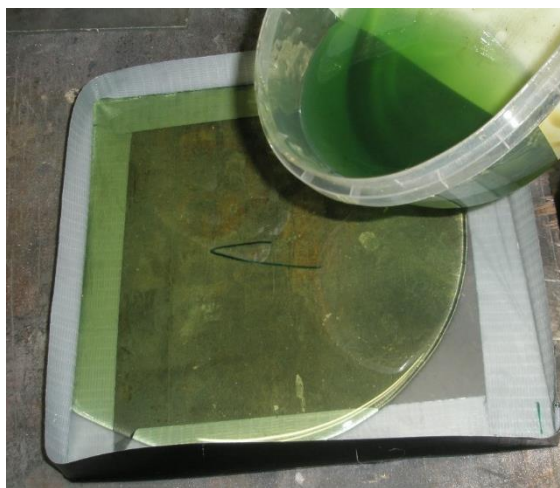
E_c – energija loma, J

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm

3.1. Uzorak 1. Kompozit ojačan s dva sloja lanene tkanine

Kompozit ojačan s dva sloja lanene tkanine izrađen je na način da je na staklenu podlogu nanoseno odvajalo (Norpol Wax W 70, Reichold), kako bi se kompozitna ploča lakše odvojila od podloge. Na staklenu podlogu premazano je pet slojeva voska, svaki dan se nanosio jedan sloj iz razloga što se prethodni sloj mora osušiti kako bi se mogao nanijeti idući. Kada je podloga bila pripremljena, na nju se izlio sloj poliesterske smole (slika 18) u koju je stavljen 1% katalizatora BUTAN OXM50.



Slika 18. Prekrivanje podloge smolom

Zatim su se položila dva sloja lanenih tkanina (lanena tkanina pod rednim brojem 1 i 2). Obzirom da tkanina ima bolja svojstva u smjeru pređe u odnosu na smjer potke, platna su postavljena obzirom na smjer jedno okomito na drugo. Polaganje lanenih tkanina prikazano je na slici 19.



Slika 19. Polaganje lanenih tkanina

Kompozit nakon umrežavanja smole prikazan je na slici 20



Slika 20. Kompozit ojačan s dva sloja lanenih vlakana

Nakon vaganja izračunao se maseni i volumni udio vlakana, a rezultati su prikazani u tablici 6.

$$w = \frac{m_v}{m_k}$$

gdje je:

w - maseni udio

m_v - masa vlakana

m_k - masa kompozita

$$\phi = \frac{V_v}{V_k}$$

gdje je:

ϕ - volumni udio

V_v - volumen vlakna

V_k - volumen kompozita

$$V_v = \frac{m_v}{\rho_v}$$

gdje je:

ρ_v - gustoća vlakna

Tablica 6. Izračun masenog i volumnog udjela uzorka 1

m_k [g]	m_v [g]	w [%]	ρ_v [g/mm ³]	V_v [mm ³]	V_k [mm ³]	ϕ [%]
295,3	37,9	13	0.0015	26467	230706	12

Maseni udio vlakana iznosi 13%, a volumni udio vlakana je 12%.

Na rubovima se nalazi više smole jer je podloga bila malo veća od tkanina. Rubovi ojačala oblijepljeni su ljepljivom trakom kako ne bi dolazilo do odvajanja vlakana prilikom izrade kompozita, zbog toga je bilo potrebno odrezati rubove kako takvi dijelovi ne bi utjecali na mehanička svojstva materijala (slika 21).



Slika 21. Rezanje rubova kompozita

3.1.1. Rastezna čvrstoća

Prema normi su izrezane epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće, širina epruvete treba biti 10 mm (slika 22). Kod lanenog ojačala u toj dimenziji su negdje prisutna dva vlakna a negdje jedno, zbog čega su moguća odstupanja prilikom ispitivanja.



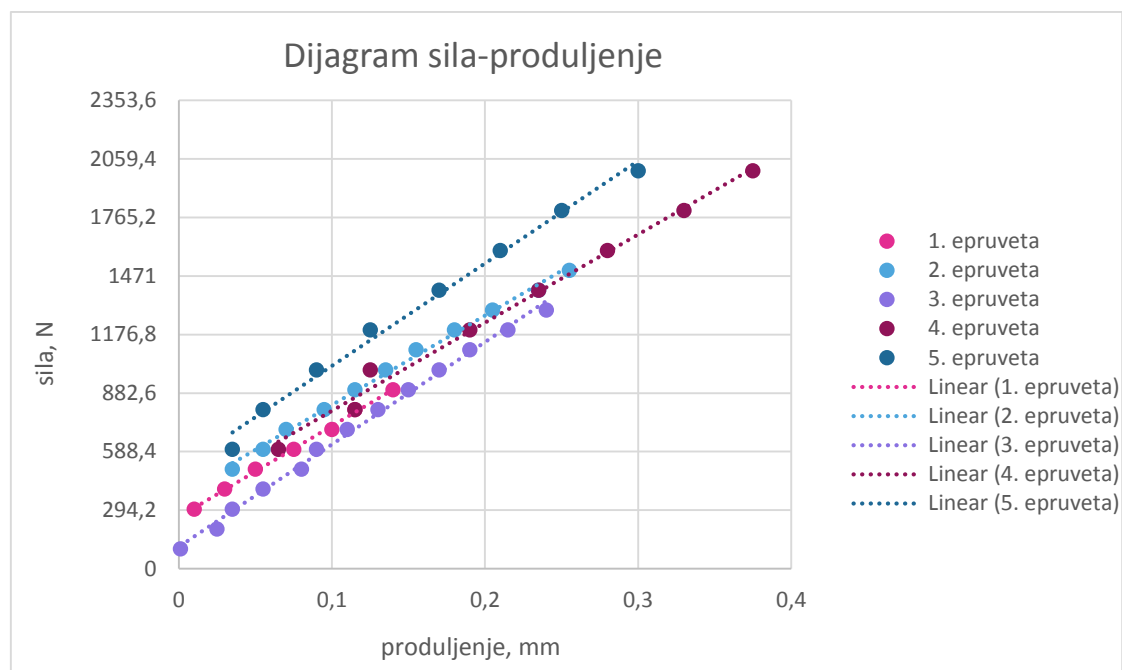
Slika 22. Epruvete kompozita

Epruvete su zatim podvrgnute statično-rasteznom ispitivanju. Mjerno područje je 2400 N, a brzina opterećenja je 7mm/min. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Produljenja pri opterećenju za uzorak 1

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
<i>b</i> [mm]	10,4	10,8	10,6	10,5	10,6
<i>h</i> [mm]	4,7	4,7	5	4,4	4,8
<i>S₀</i> [mm²]	48,88	50,76	53	46,2	50,88
<i>F</i> [N]	ΔL [mm]				
100	0,005	0,005	0,005		
200	0,005	0,001	0,05	0,01	0,005
300	0,01	0,015	0,001		
400	0,03	0,015	0,025	0,015	0,02
500	0,05	0,035	0,035		
600	0,075	0,055	0,055	0,065	0,035
700	0,1	0,07	0,08		
800	0,115	0,095	0,09	0,115	0,055
900	0,14	0,115	0,11		
1000		0,135	0,13	0,125	0,09
1100		0,155	0,15		
1200		0,18	0,17	0,19	0,125
1300		0,205	0,19		
1400		0,235	0,215	0,235	0,17
1500		0,255	0,24		
1600				0,28	0,21
1700					
1800				0,33	0,25
1900					
2000				0,375	0,3
2100					
<i>F_{max}</i> [N]	1000	2300	2660	2300	2500
<i>R_m</i> [MPa]	20,46	45,31	50,19	49,78	49,14

Na slici 23 prikazan je dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 1, dok su u tablici 6 prikazane jednadžbe pravaca iste ovisnosti. Iz dijagrama se može zaključiti kako ne postoje značajna odstupanja u ponašanju ispitnih uzoraka. Epruveta 5 se malo drugačije ponaša, ali ne odskaka bitno od ostalih.



Slika 23. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 1

Slijedi tablica 7 koja pokazuje ovisnost produljenja o opterećenju, prikazane jednačbe su potrebne za izračun modula elastičnosti.

Tablica 7. Jednačbe pravca ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 1

Ispitni uzorak	Jednačba pravca
1	$F_1 = 4579,1L_1 + 259,84$
2	$F_2 = 4499L_2 + 372,18$
3	$F_3 = 5137,2L_3 + 110,8$
4	$F_4 = 4434,8L_4 + 349,3$
5	$F_5 = 5149,5L_5 + 505,05$

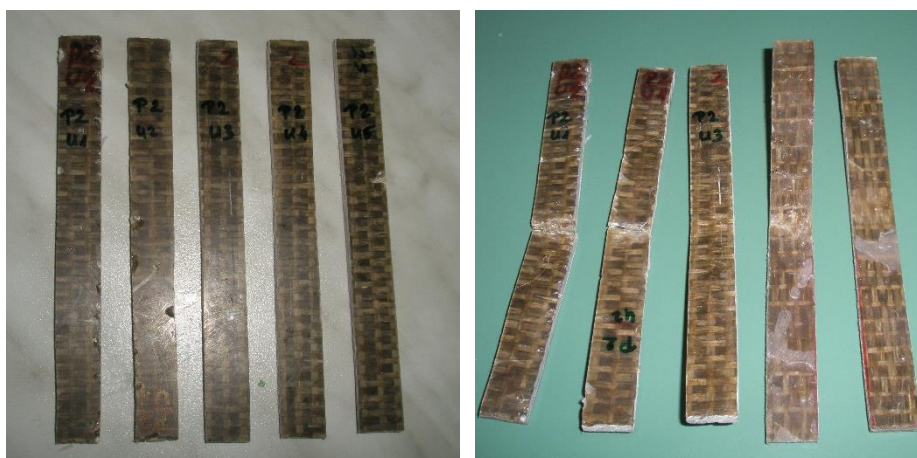
Tablica 8. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 1

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [MPa]	R_m [MPa]
1	10,40	4,70	48,88	4579,10	50,00	1000,00	4684,02	20,46
2	10,80	4,70	50,76	4499,00	50,00	2300,00	4431,64	45,31
3	10,60	5,00	53,00	5137,20	50,00	2660,00	4846,42	50,19
4	10,50	4,40	46,20	4434,80	50,00	2300,00	4799,57	49,78
5	10,60	4,80	50,88	5149,50	50,00	2500,00	5060,44	49,14
\bar{x}	10,58	4,72	49,94	4759,92	50,00	2152,00	4764,42	42,98
S	0,15	0,22	2,55	353,76	0,00	661,45	230,65	12,74

Iz tablice 8 može se očitati kako je odstupanje za maksimalnu silu potrebnu za lom epruvete vrlo veliko. Razlog tome je što se u normiranoj širini epruvete ne nalazi jednak broj čitavih uzdužnih vlakana lana, što je utjecalo na razlike u vrijednosti maksimalne sile, a time i rastezne čvrstoće.

3.1.2. Savojna čvrstoća

Uzorci za ispitivanje savojne čvrstoće su prikazani na slici 24.



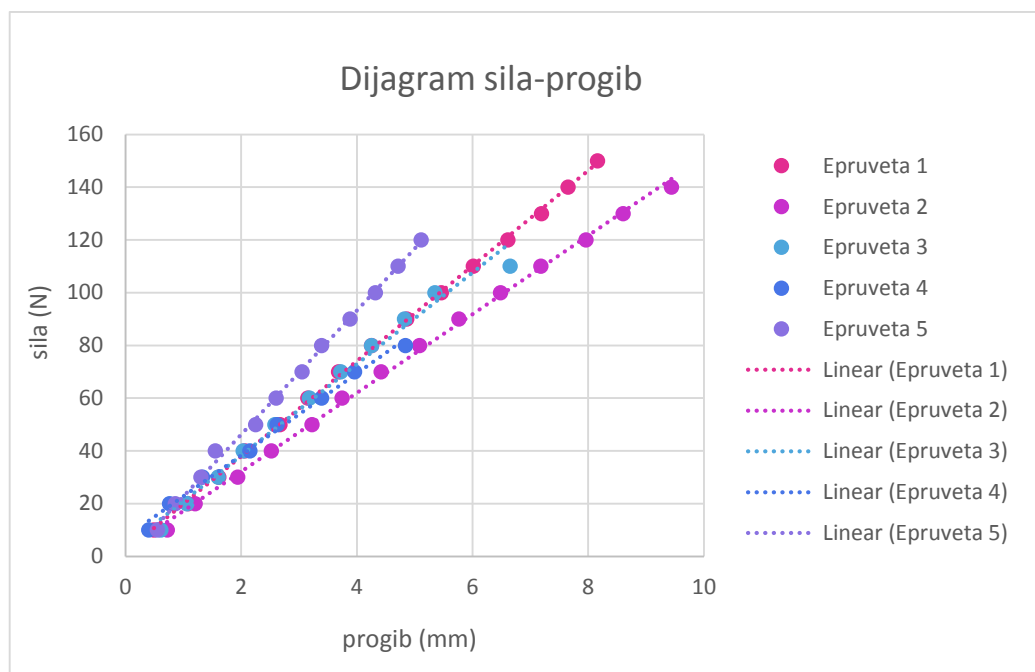
Slika 24. Epruvete uzorka 1 za savojno ispitivanje prije i poslije opterećivanja

U tablici 9 zabilježeni su progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak 1. Za ispitni uzorak 1 bilježeni su progibi pod opterećenjem do 150 N, a progibi su očitavani u razmaku opterećenja 10 N.

Tablica 9. Progibi pri opterećenjima za uzorak 1

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
b [mm]	15,1	14,6	15	14,6	15,3
h [mm]	5	4,8	5,2	4,8	5,3
S_0 [mm²]	75,5	70,08	78	70,08	81,09
F [N]	Δf [mm]				
10	0,49	0,72	0,61	0,40	0,55
20	1,08	1,2	1,06	0,76	0,86
30	1,61	1,94	1,60	1,33	1,3
40	2,06	2,52	2,03	2,15	1,55
50	2,67	3,22	2,58	2,62	2,25
60	3,15	3,74	3,18	3,39	2,60
70	3,68	4,42	3,72	3,96	3,05
80	4,25	5,08	4,25	4,84	3,39
90	4,86	5,76	4,82		3,88
100	5,46	6,48	5,35		4,32
110	6,01	7,18	6,65		4,71
120	6,61	7,96			5,11
130	7,19	8,60			
140	7,65	9,44			
150	8,16				
F_{max} [N]	198	150	150	104	168
R_{ms} [MPa]	78,68	66,89	55,47	46,38	58,64

Iz dijagrama na slici 25 vidljiva je ovisnost progiba o opterećenju za uzorak 1. Primjećuje se kako se uzorci ponašaju različito ovisno o opterećenju. Razlog tome je taj što su lanena vlakna prirodna vlakna kojima su svojstva ovisna o morfologiji vlakana. Također, unutar uzoraka različit je raspored vlakana. Kroz rezultate ispitanih uzoraka aproksimirani su pravci kako bi se mogao odrediti nagib pravca potreban za izračun savojne čvrstoće. Jednadžbe aproksimiranih pravaca vrijednosti progiba u ovisnosti o opterećenju navedeni su tablici 10.



Slika 25. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 2

Tablica 10. Jednadžbe pravaca ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 2

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 18,051f_1 + 1,8645$
2	$F_2 = 14,914f_2 + 2,2825$
3	$F_3 = 17,348f_3 + 3,462$
4	$F_4 = 15,525f_4 + 7,256$
5	$F_5 = 23,493f_5 - 0,721$

Tablica 11. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 1

Redni broj epruvete	h [mm]	b [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [MPa]	R_{ms} [MPa]	F_{max} [MPa]
1	5	15,1	18	100	2390,9	78,7	198
2	4,8	14,6	14,914	100	2309,2	66,9	150
3	5,2	15	17,348	100	2056,3	55,5	150
4	4,8	14,6	15,525	100	2403,8	46,4	104
5	5,3	15,3	23,493	100	2578,5	58,6	168
\bar{X}	5,02	14,92	17,87	100,00	2347,72	61,21	154,00
S	0,23	0,31	3,40	0,00	190,16	12,22	34,15

U tablici 11 prikazani su rezultati ispitivanja savojne čvrstoće uzorka 1. Vidljiva su odstupanja koja su u normalnim granicama.

3.1.3. Međuslojna čvrstoća

Epruvete za ispitivanje međuslojne čvrstoće prikazani su na slici 26.



Slika 26. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće

U tablici 12 prikazani su rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 1

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	F_{max} [N]	τ [MPa]
1	22,20	4,30	600,00	4,71
2	21,90	5,00	700,00	4,79
3	19,00	4,80	600,00	4,93
4	20,20	5,10	780,00	5,68
5	24,30	4,30	760,00	5,46
\bar{X}	21,52	4,70	688,00	5,12
S	2,03	0,38	85,56	0,43

3.1.4. Tvrdća

Tvrdoće nakon 10, 30 i 60 sekundi za uzorak 1 prikazane su u tablici 13. Dubine prodiranja kuglice su promijenjene za korekcijski faktor. Korekcijski faktor je vrijednost za koju se mora umanjiti izmjerena vrijednost zbog deformacije uređaja Wwick 3106 dana od proizvođača uređaja. Korekcijski faktor za primijenjenu silu od 132 N iznosi 0,015.

Tablica 13. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće uzorka 1

očitanje	uzorak 1		
	10 s	30 s	60 s
1	0,085	0,090	0,091
2	0,110	0,115	0,120
3	0,125	0,135	0,135
4	0,165	0,175	0,180
5	0,285	0,290	0,310
6	0,170	0,180	0,180
7	0,080	0,085	0,085
8	0,080	0,085	0,085
9	0,060	0,065	0,070
10	0,070	0,075	0,075
\bar{X}	0,123	0,130	0,133
S	0,065	0,066	0,070
H [MPa]	68,68	65,24	63,47

3.1.5. Udarne žilavost

Uređaj za ispitivanje udarne žilavosti vidljiv je na slici 27.



Slika 27. Charpy-ev bat za mjerenje udarnog rada loma

U tablici 14 prikazani su rezultati mjerenja udarne žilavosti za uzorak 1.

Tablica 14. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 1

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	A_{cu} [kJ/m ²]
1	10,51	4,61	3,05	62,95
2	10,24	4,41	3,60	79,72
3	10,40	4,49	3,00	64,25
4	10,30	4,31	3,60	81,09
5	10,29	4,53	2,70	57,92
\bar{X}	10,35	4,47	3,19	68,96
S	0,11	0,11	0,40	10,52

3.2. Uzorak 2. Kompozit ojačan s četiri sloja staklene tkanine

Priprema podloge napravljena je na isti način kao na uzorku 1. Na podlogu je nanosena poliesterska smola i četiri sloja staklenih vlakana (redni broj 3,4,5,6). Izrada je prikazana na slici 28.



Slika 28. Lijevo- nanošenje smole na podlogu, sredina- polaganje vlakana, desno-nanošenje smole na položena vlakna

Rubovi su odrezani kako ne bi narušavali mehanička svojstva. Maseni udio iznosi 20%, a volumni udio iznosi 12% kao što piše u tablici 15.

Tablica 15. Prikaz volumnih i masenih udjela uzorka 2

m_k [g]	m_v [g]	w [%]	ρ_v [g/mm ³]	V_v [mm ³]	V_k [mm ³]	ϕ [%]
282,7	57,5	20	0.0025	23000	188760	12

Nakon vaganja uzorka odrezani su rubovi (slika 29).



Slika 29. Lijevo- kompozitna ploča, desno-kompozitna ploča bez rubova

3.2.1. Rastezna čvrstoća

Epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće prije i poslije ispitivanja prikazane su na slici 30.



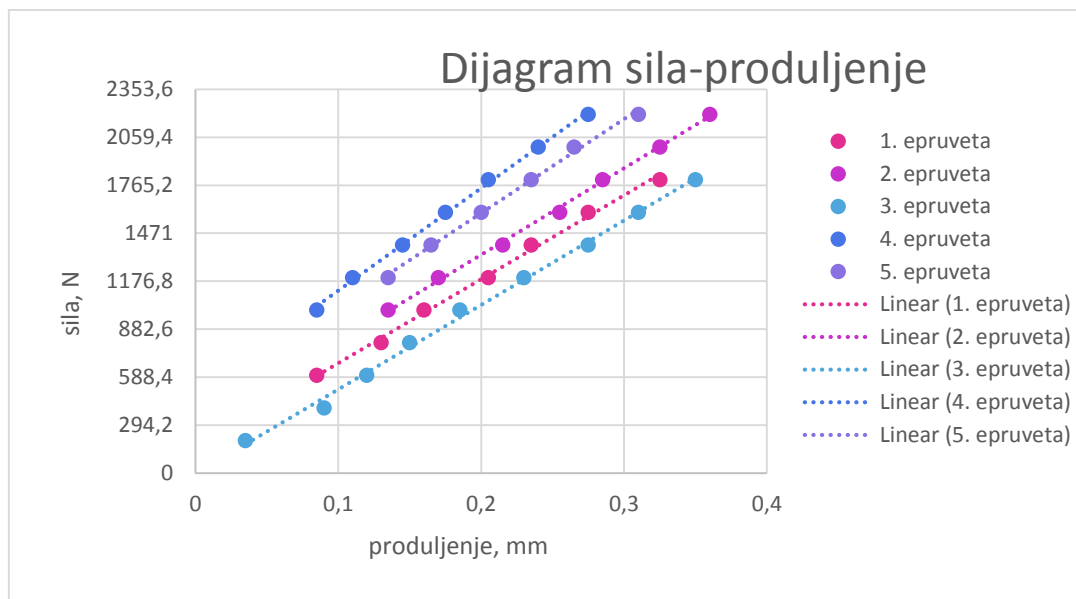
Slika 30. Epruvete prije i poslije rasteznog ispitivanja

Tablica 16. Produljenja pri opterećenju za uzorak 2

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
b [mm]	9,8	10	9,9	10	9,7
h [mm]	4,7	4,4	4,4	4,4	4,46
S_0 [mm²]	46,06	44	43,56	44	43,262
F [N]	ΔL [mm]				
200	0,015	0,015	0,005	0,005	0,015
400	0,055	0,045	0,025	0,015	0,025
600	0,085	0,075	0,035	0,025	0,045
800	0,13	0,105	0,09	0,045	0,07
1000	0,16	0,135	0,12	0,085	0,1
1200	0,205	0,17	0,15	0,11	0,135
1400	0,235	0,215	0,185	0,145	0,165
1600	0,275	0,255	0,23	0,175	0,2
1800	0,325	0,285	0,275	0,205	0,235
2000	0,34	0,325	0,31	0,24	0,265
2200	0,405	0,36	0,35	0,275	0,31
F_{max} [N]	3780	3980	3780	4220	4500
R_m [MPa]	82,07	90,45	86,78	95,91	104,02

Iz tablice 16 primjetno je da su produljenje i maksimalna čvrstoća ujednačenih vrijednosti. To proizlazi iz svojstva staklene tkanine koja ima jednaka svojstva u oba smjera. Osim toga staklena vlakna su filamentna pa zbog toga u korištenoj tkanini nema spajanja vlakana što pridonosi ujednačenosti rezultata, ali i boljim mehaničkim svojstvima.

Dijagram na slici 31 pokazuje ovisnost produljenja o opterećenju iz kojeg je vidljivo da se uzorci ponašaju podjednako te da nema odstupanja pojedinih uzoraka, a razlog je već objašnjena priroda staklenih vlakana.



Slika 31. Produljenja pri opterećenjima za uzorak 2

U tablici 17 mogu se očitati nagibi pravaca ispitnih uzoraka koji prikazuju ovisnost produljenja o opterećenju, a potrebni su za izračun modula elastičnosti.

Tablica 17. Jednadžbe pravaca ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 2

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 5143,1L_1 + 160,37$
2	$F_2 = 5298,7L_2 + 279,12$
3	$F_3 = 5177,1L_3 - 3,7851$
4	$F_4 = 6281,8L_4 + 491,71$
5	$F_5 = 5766,5L_5 + 440,98$

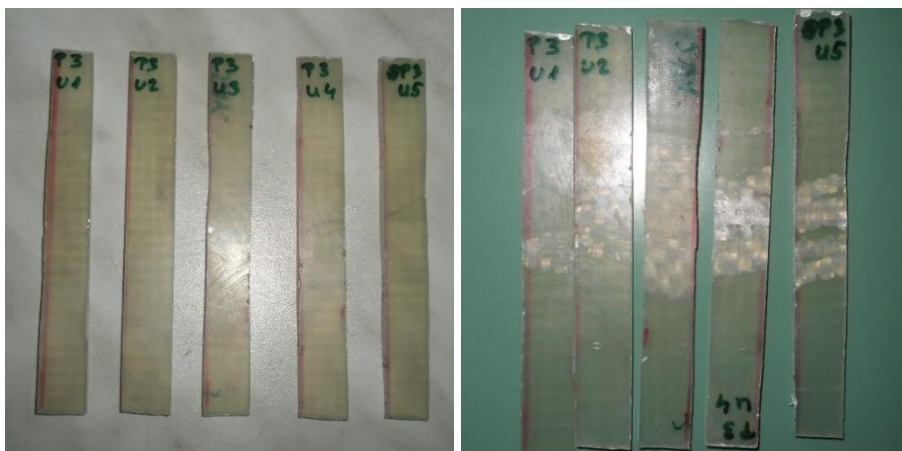
Tablica 18 prikazuje rezultate ispitivanja rastezne čvrstoće uzorka 2, aritmetičke sredine rezultata te njihovu standardnu devijaciju.

Tablica 18. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 2

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [MPa]	R_m [MPa]
1	9,80	4,70	46,06	5143,10	50,00	3780,00	5583,04	82,07
2	10,00	4,40	44,00	5298,70	50,00	3980,00	6021,25	90,45
3	9,90	4,40	43,56	5177,10	50,00	3780,00	5942,49	86,78
4	10,00	4,40	44,00	6281,80	50,00	4220,00	7138,41	95,91
5	9,70	4,60	44,62	5766,50	50,00	4500,00	6461,79	100,85
\bar{X}	9,88	4,50	44,45	5533,44	50,00	4052,00	6229,40	91,21
S	0,13	0,14	0,98	487,03	0,00	309,06	596,60	7,40

3.2.2. Savojna čvrstoća

Slike epruveta za ispitivanje savojne čvrstoće prikazane su na slici 32.

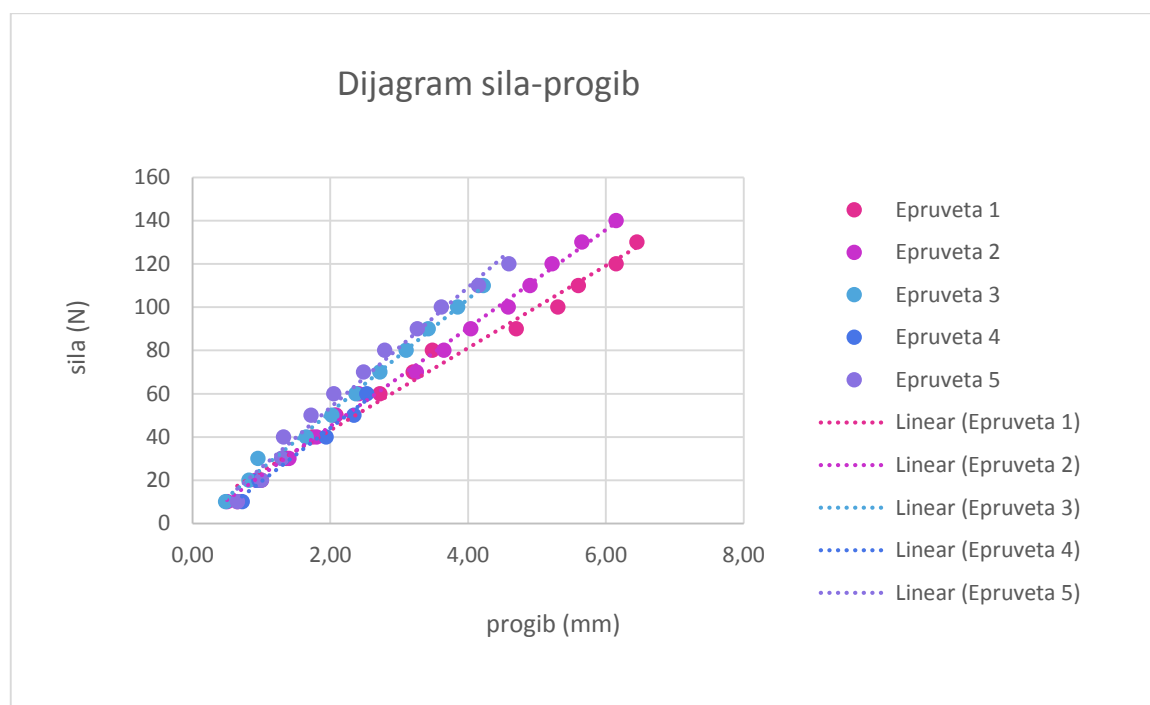


Slika 32. Epruvete prije i poslije ispitivanja savojne čvrstoće

Tablica 19. Progibi pri opterećenjima za uzorak 2

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
b [mm]	14,60	15,40	13,70	15,00	14,50
h [mm]	4,30	4,00	4,40	4,50	4,60
S_0 [mm ²]	62,78	61,6	60,28	67,5	66,7
F [N]	Δf [mm]				
10	0,65	0,50	0,48	0,72	0,65
20	1,00	0,92	0,82	0,96	1,00
30	1,36	1,40	0,95	1,30	1,29
40	1,74	1,80	1,65	1,94	1,32
50	2,08	2,07	2,02	2,34	1,72
60	2,72	2,41	2,37	2,53	2,05
70	3,20	3,25	2,72	2,73	2,48
80	3,48	3,65	3,10	3,00	2,79
90	4,70	4,04	3,42	3,40	3,26
100	5,30	4,58	3,85	3,75	3,61
110	5,60	4,90	4,22	4,35	4,15
120	6,15	5,22		4,82	4,59
130	6,45	5,65			4,95
140	6,91	6,15			5,30
150	7,35	6,62			
F_{max} [N]	180	220	282	226	280
R_{ms} [MPa]	87,21	116,79	139,07	97,32	119,37

U tablici 19 zabilježeni su progibi u ovisnosti o opterećenju za uzorak 2. Progibi su očitavani u razmaku od 10 N do 150 N. Pomoću podataka iz navedene tablice dobivene su vrijednosti za dijagram sila – progib. Iz dijagrama na slici 33 vidljiva je ovisnost progiba o opterećenju za uzorak 2. Primjećuje se da se epruvete 1 i 2 ponašaju različito od ostalih epruveta, no ta odstupanja nisu značajna.



Slika 33. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 2

Na temelju grafičkog prikaza dobiveni su podaci za tablicu 20.

Tablica 20. Jednadžbe pravaca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak 2

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 19,031f_1 + 4,9564$
2	$F_2 = 22,73f_2 - 0,5596$
3	$F_3 = 26,172f_3 - 0,9098$
4	$F_4 = 24,731f_4 - 5,3528$
5	$F_5 = 27,782f_5 - 1,932$

Tablica 21. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 2

Redni broj epruvete	h [mm]	b [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [MPa]	R_{ms} [MPa]	F_{max} [MPa]
1	4,30	14,60	19,031	87,2	2717,6	87,21	180
2	4,00	15,40	22,730	87,2	3822,9	116,79	220
3	4,40	13,70	26,172	87,2	3717,5	139,07	282
4	4,50	15,00	24,731	87,2	2999,2	97,32	226
5	4,60	14,50	27,782	87,2	3263,0	119,37	280
\bar{X}	4,36	14,64	24,089	87,20	3304,02	111,95	237,60
S	0,23	0,63	3,38	0,00	468,66	20,25	43,39

Tablica 21 prikazuje aritmetičku sredinu rezultata ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 2 i ostale parametre dobivene na temelju podataka iz savojnog ispitivanja.

3.2.3. Međuslojna čvrstoća

Epruvete za ispitivanje međuslojne čvrstoće prikazane su na slici 34. . Dubine prodiranja kuglice su promijenjene za korekcijski faktor.



Slika 34. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće

U tablici 22 mogu se očitati podaci dobiveni ispitivanjem međuslojne čvrstoće, njihova aritmetička sredina i standardna devijacija.

Tablica 22. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 2

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	F_{max} [N]	τ [MPa]
1	20,60	3,10	1189,00	13,96
2	20,40	2,90	1190,00	15,09
3	20,30	3,60	1280,00	13,14
4	20,00	3,60	1800,00	18,75
5	20,40	3,50	1260,00	13,24
\bar{X}	20,34	3,34	1343,80	14,83
S	0,20	0,29	231,01	2,08

3.2.4. Tvrdoća

Na slici 35 prikazan je uređaj na kojem se mjerila tvrdoća.



Slika 35. Uređaj za mjerenje tvrdoće Wwick 3106

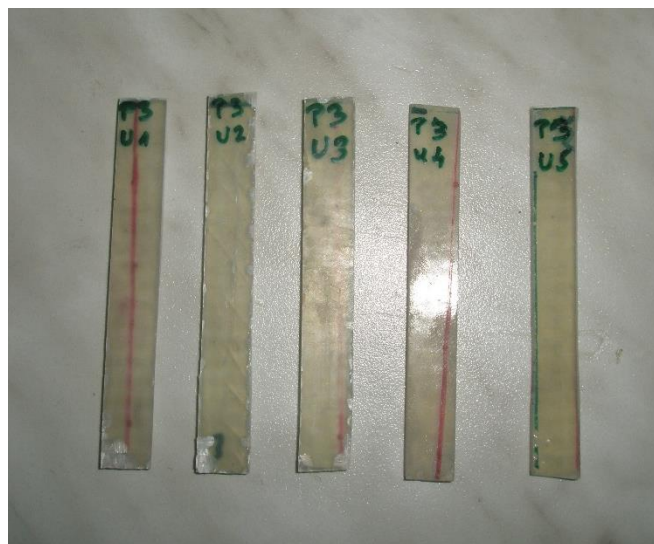
Tablica 23. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće uzorka 2

	Uzorak 2		
očitavanje	10 s	30 s	60 s
1	0,065	0,070	0,075
2	0,060	0,065	0,070
3	0,075	0,080	0,080
4	0,070	0,075	0,025
5	0,060	0,065	0,065
6	0,060	0,060	0,065
7	0,080	0,085	0,085
8	0,060	0,065	0,065
9	0,055	0,055	0,055
10	0,045	0,035	0,060
\bar{X}	0,063	0,0655	0,0645
S	0,010	0,014	0,017
H [MPa]	134,10	128,98	130,98

Iz tablice 23 moguće je očitati tvrdoće izmjerene nakon 10, 30 i 60 sec prodiranja indentora.

3.2.5. Udarna žilavost

Na slici 36 prikazane su epruvete za udarni rad loma.



Slika 36. Epruvete za ispitivanje udarnog rada loma

Tablica 24. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 2

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	A_{cu} [kJ/m ²]
1	10,51	3,21	3,70	109,67
2	10,42	2,90	3,60	119,13
3	10,92	4,34	3,10	65,41
4	10,43	2,92	3,60	118,20
5	10,62	3,31	2,90	82,50
\bar{X}	10,58	3,34	3,38	95,76
S	0,21	0,59	0,36	23,92

Tablica 24 prikazuje rezultate mjerenja udarne žilavosti, njihovu aritmetičku sredinu i vrijednost odstupanja podataka.

3.3. Uzorak 3. Kompozit ojačan s dva sloja staklene tkanine

Postupak izrade uzorka 3. je potpuno isti kao i izrada uzorka 2. Položena su staklena vlakna pod rednim brojem 1 i 2. Na slici je prikazan uzorak 3.



Slika 37. Kompozitna ploča ojačana s dva sloja stakla

Tablica 25. Prikaz volumnih i masenih udjela uzorka 3

m_k [g]	m_v [g]	w [%]	ρ_v [g/mm ³]	V_v [mm ³]	V_k [mm ³]	ϕ [%]
230	28	14	0.0025	11200	171417	7

Maseni udio ojačala iznosi 12%, a volumni 7% (tablica 25).

3.3.1. Rastezna čvrstoća

Epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće prikazane su na slici 38, a samo ispitivanje može se vidjeti na slici 39.



Slika 38. Epruvete prije i poslije ispitivanja rastezne čvrstoće

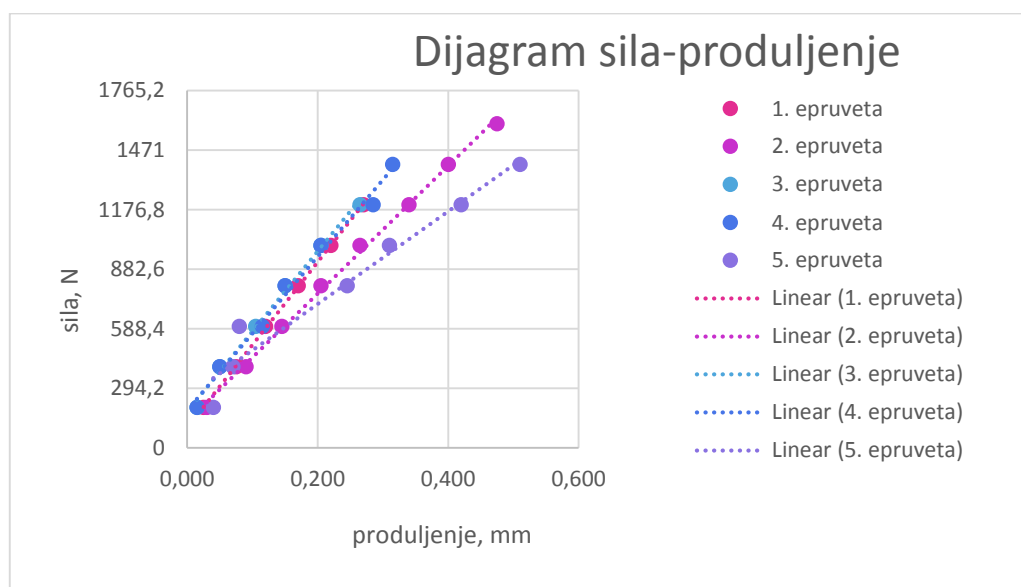


Slika 39. Kidanje epruvete prilikom statičkog rasteznog pokusa

Tablica 26. Produljenja pri opterećenju za uzorak 3

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
b [mm]	10,0	9,9	9,9	10,0	9,3
h [mm]	3,6	3,6	3,5	3,7	3,6
S_0 [mm ²]	36	35,64	34,65	37	33,48
F [N]	ΔL [mm]				
200	0,025	0,030	0,015	0,015	0,040
400	0,075	0,090	0,050	0,050	0,070
600	0,120	0,145	0,105	0,115	0,080
800	0,170	0,205	0,150	0,150	0,245
1000	0,220	0,265	0,205	0,205	0,310
1200	0,270	0,340	0,265	0,285	0,420
1400		0,400		0,315	0,510
1600		0,475			
F_{max} [N]	2080	2660	2260	2380	2000
R_m [MPa]	57,78	74,64	65,22	64,32	59,74

Prilikom statičkog rasteznog pokusa vrlo rano je došlo do kidanja smole (tablica 26) te zbog toga produljenje se nije nastavilo mjeriti jer tada više ne bi bili referenti podaci. Razlog kidanja smole je mali maseni ali i volumni udio ojačala u kompozitu. Temeljem izmjerenih podataka napravljen je dijagram sila – produljenje.



Slika 40. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 3

Na slici 40 prikazan je dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 3. Može se primijetiti kako su ispitni uzorci 2 i 5 više odvojeni od ostalih ispitnih uzoraka. Razlog tog odvajanja se također nalazi u činjenici da zbog pucanja smole postoji manji broj ulaznih podataka za dijagram sila - produljenje. Na temelju dijagrama izvučeni su podaci za tablicu 27.

Tablica 27. Jednadžbe pravaca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak 3

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 4092,5L_1 + 99,761$
2	$F_2 = 3157,2L_2 + 130,43$
3	$F_3 = 3956,5L_3 + 179,06$
4	$F_4 = 3797,5L_4 + 184,26$
5	$F_5 = 2286L_5 + 252,98$

Tablica 28. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 3

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [MPa]	R_m [MPa]
1	10,00	3,60	36,00	4092,50	50,00	2080,00	5684,03	57,78
2	9,90	3,60	35,64	3157,20	50,00	2660,00	4429,29	74,64
3	9,90	3,50	34,65	3956,50	50,00	2260,00	5709,24	65,22
4	10,00	3,70	37,00	3797,50	50,00	2380,00	5131,76	64,32
5	9,30	3,60	33,48	2286,00	50,00	2000,00	3413,98	59,74
\bar{X}	9,82	3,60	35,35	3457,94	50,00	2276,00	4873,66	64,34
S	0,29	0,07	1,34	746,73	0,00	261,30	968,20	6,54

Modul elastičnosti računat je pomoću tablice 28. Kako je zbog već prije navedenih razloga manji broj ulaznih podataka, veće je i rasipanje vrijednosti modula elastičnosti.

3.3.2. Savojna čvrstoća



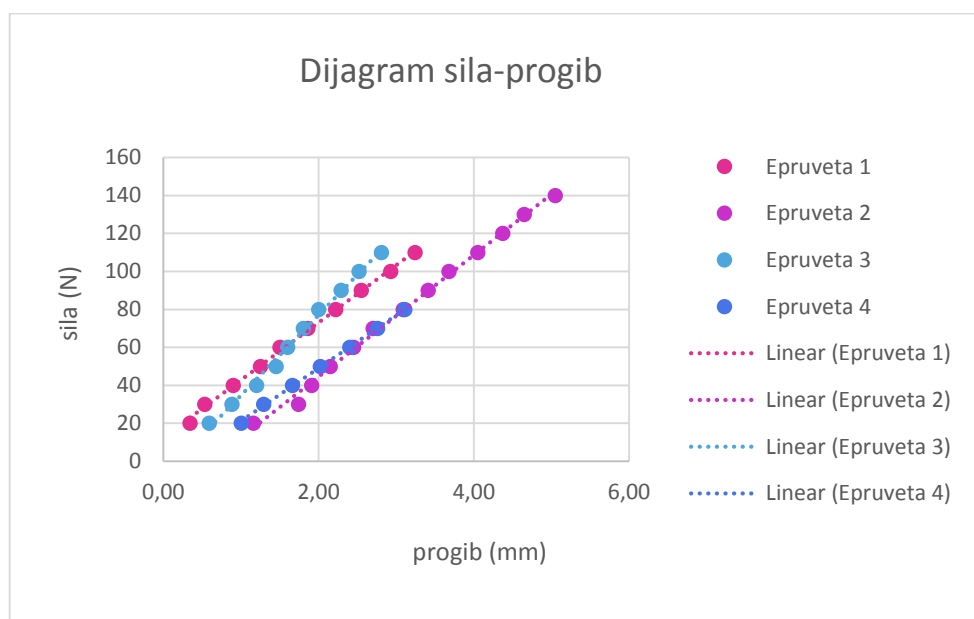
Slika 41. Epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće

Zbog nedostatka mjesta na ploči uzorka 3, izrađene su samo četiri epruvete za savojno ispitivanje (slika 41).

Tablica 29. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 3

	REDNI BROJ EPRUVETE			
	1	2	3	4
b [mm]	15,20	15,40	15,30	15,30
h [mm]	3,60	3,90	3,50	3,50
S_0 [mm ²]	54,72	60,06	53,55	53,55
F [N]	Δf [mm]			
10	0,04	1,00	0,30	0,69
20	0,34	1,16	0,59	1,00
30	0,53	1,74	0,88	1,29
40	0,90	1,91	1,20	1,66
50	1,25	2,15	1,45	2,02
60	1,50	2,45	1,60	2,40
70	1,86	2,70	1,80	2,76
80	2,22	3,09	2,00	3,11
90	2,55	3,41	2,29	3,42
100	2,93	3,68	2,52	3,77
110	3,24	4,05	2,81	4,11
120	2,38	4,37	3,10	4,83
130		4,65	3,38	5,21
140		5,05	3,66	
150		5,31		
160		5,74		
170		6,05		
F_{max} [N]	324	330	350	276
R_{ms} [MPa]	178,87	153,21	203,08	160,14

Na temelju tablice 29 izrađen je dijagram i uzeti su podaci za računanje savojnog modula elastičnosti.



Slika 42. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 3

U dijagramu na slici 42. postoje velika odstupanja, razlog je velika količina matrice u odnosu na ojačalo. Iz tog razloga dolazi do nepredvidljivog pucanja smole uzoraka dok vlakna ostaju čitava. Pomoću dijagrama dobiveni su podaci jednadžbe pravaca (tablica 30) potrebni za računanje modula elastičnosti.

Tablica 30. Jednadžbe pravaca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 30,254f_1 + 12,6$
2	$F_2 = 32,258f_2 - 20,415$
3	$F_3 = 41,359f_3 - 5,5723$
4	$F_4 = 28,502f_4 - 8,1919$

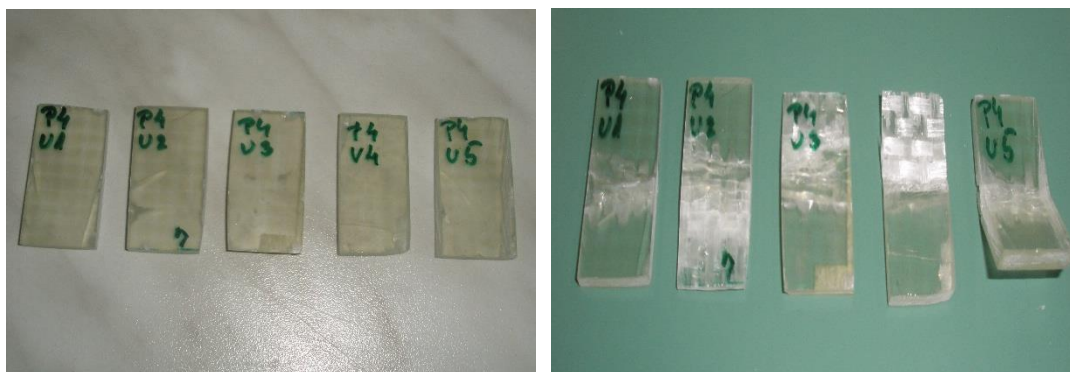
Tablica 31. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 3

Redni broj epruvete	h [mm]	b [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [MPa]	R_{ms} [MPa]	F_{max} [MPa]
1	3,60	15,20	30,254	72,5	4064,3	178,87	324
2	3,90	15,40	32,258	72,5	3364,2	153,21	330
3	3,50	15,30	41,359	72,5	6006,6	203,08	350
4	3,50	15,30	28,502	72,5	4139,4	160,14	276
\bar{X}	3,63	15,30	33,093	72,50	4393,61	173,83	320,00
S	0,19	0,08	5,72	0,00	1130,57	22,31	31,37

Iz tablice 31 moguće je čitati srednje vrijednosti za savojnu čvrstoću, savojni modul elastičnosti i maksimalne sile prilikom koje je došlo do loma epruvete. Vidljiva su vrlo velika odstupanja savojnog modula elastičnosti. Razlog su, kao što je već objašnjeno, loš omjer smole i ojačala.

3.3.3. Međuslojna čvrstoća

U nastavku su (slika 43) prikazane epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće, dobiveni rezultati ispisani su u tablici 32.



Slika 43. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće

Tablica 32. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 3

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	F_{max} [N]	τ [MPa]
1	18,30	3,10	1700,00	22,47
2	18,20	3,20	1400,00	18,03
3	18,50	3,20	1400,00	17,74
4	17,40	3,40	1380,00	17,49
5	18,30	3,30	1600,00	19,87
\bar{X}	18,14	3,24	1496,00	19,12
S	0,43	0,11	145,19	2,10

3.3.4. Tvrdća

Tablica 33. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka 3

očitanje	Uzorak 3		
	10 s	30 s	60 s
1	0,095	0,100	0,105
2	0,105	0,110	0,115
3	0,145	0,150	0,155
4	0,135	0,140	0,145
5	0,165	0,170	0,175
6	0,145	0,150	0,150
7	0,140	0,145	0,150
8	0,065	0,070	0,835
9	0,055	0,060	0,060
10	0,055	0,055	0,060
\bar{X}	0,111	0,115	0,195
S	0,041	0,042	0,228
H [MPa]	76,45	73,46	43,32

Čvrstoća uzorka 3 je izmjerena i zapisana u tablici 33. Dubine prodiranja kuglice su promijenjene za korekcijski faktor.

3.3.5. Udarne žilavost

Tablica 34. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 3

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	A_{cu} [kJ/m ²]
1	10,20	3,36	0,87	25,39
2	10,02	3,28	0,67	20,39
3	10,34	3,18	0,82	24,94
4	9,88	3,16	0,87	27,87
5	10,22	3,20	0,68	20,79
\bar{X}	10,13	3,24	0,78	23,85
S	0,18	0,08	0,10	3,20

Udarne žilavost, aritmetička sredina podataka i odstupanja vrijednosti vidljivi su u tablici 34.

3.4. Uzorak 4. Kompozit ojačan s jednim slojem staklene tkanine i jednim slojem lanene tkanine

Način izrade je isti kao kod prethodnih uzoraka, ali su ojačala drugačija. Položena je jedna tkanina stakla i jedna tkanina lana. Izgled kompozita prije umrežavanja smole je prikazan na slici 44 .



Slika 44. Kompozit ojačan staklenim i lanenim pletivom

Tablica 35. Prikaz volumnih i masenih udjela uzorka 4

m_k [g]	m_v [g]	w [%]	ρ_{vs} [g/mm ³]	ρ_{vl} [g/mm ³]	V_{vl} [mm ³]	V_{vs} [mm ³]	V_v [mm ³]	V_k [mm ³]	ϕ [%]
279	32	12	0.0025	0.0015	12200	5580	17780	217397	8

Maseni udio vlakana iznosi 12%, a volumni 8% (tablica 35).

Uzorci su izrezani u smjeru lanenih vlakana, jer su u tom smjeru bolja mehanička svojstva.

3.4.1. Rastezna čvrstoća

Epruvete prije i poslije mjerenja rastezne čvrstoće prikazane su na slici 45.

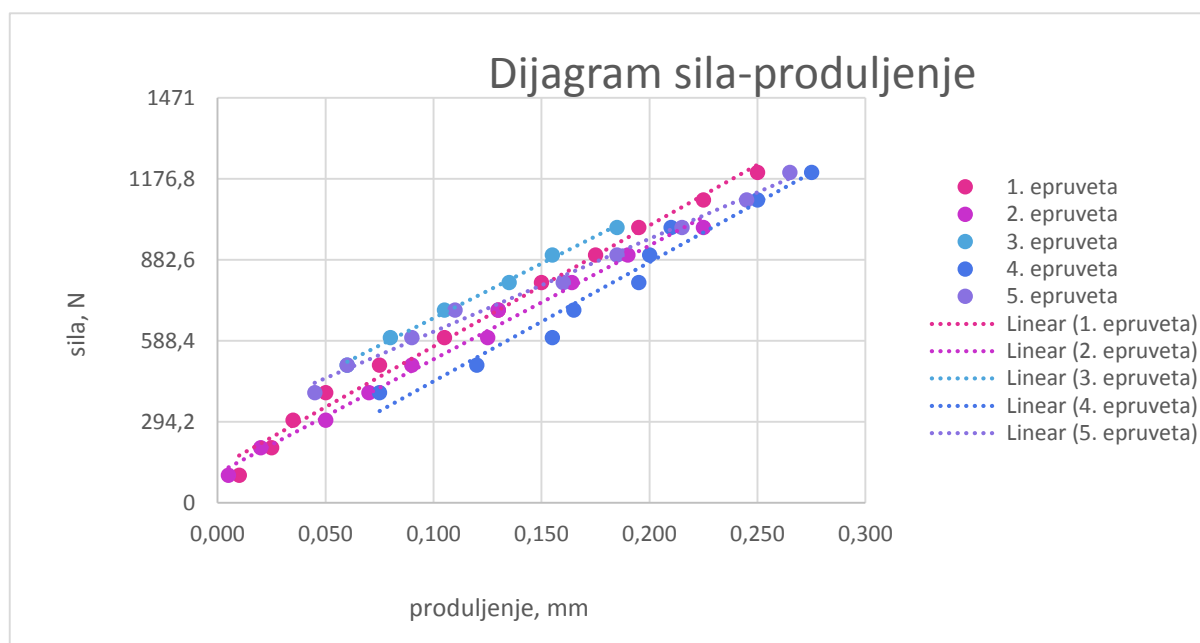


Slika 45. Epruvete prije i poslije ispitivanja rastezne čvrstoće uzorka 4

Tablica 36. Produljenja pri opterećenju za uzorak 4

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
b [mm]	10,00	9,30	9,60	10,20	10,10
h [mm]	4,10	4,10	4,10	4,60	5,00
S_0 [mm²]	41,00	38,13	39,36	46,92	50,50
F [N]	ΔL [mm]				
100	0,010	0,005	0,015	0,010	0,005
200	0,025	0,020	0,030	0,015	0,020
300	0,035	0,050	0,040	0,035	0,030
400	0,050	0,070	0,050	0,075	0,045
500	0,075	0,090	0,060	0,120	0,060
600	0,105	0,125	0,080	0,155	0,090
700	0,130	0,130	0,105	0,165	0,110
800	0,150	0,164	0,135	0,195	0,160
900	0,175	0,190	0,155	0,200	0,185
1000	0,195	0,225	0,185	0,210	0,215
1100	0,225	0,275	0,265	0,250	0,245
1200	0,250		0,255	0,275	0,265
1300			0,320	0,315	
1400				0,380	
1500				0,400	
F_{max} [N]	2140	1300	1500	2000	1800
R_m [MPa]	52,20	34,09	38,11	42,63	35,64

U tablici 36 su dane vrijednosti produljenja pod opterećenjem za uzorak 4 koji je ojačan slojem staklene tkanine i slojem lanene tkanine. Produljenje je mjereno svakih 100 N, a podaci su iskorišteni za dijagram sila – produljenje. Na dijagramu je vidljivo da postoje odstupanja u ponašanju ispitnih uzoraka. Na temelju dijagrama (slika 46) očitani su nagibi pravaca ispitnih uzoraka koji pokazuju ovisnost produljenja o opterećenju a prikazani su u tablici 37.



Slika 46. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 4

Tablica 37. Jednadžbe pravaca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak 4

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 4404,1L_1 + 127,01$
2	$F_2 = 4137,5L_2 + 107,7$
3	$F_3 = 3964L_3 + 274,32$
4	$F_4 = 4326,6L_4 + 9,1916$
5	$F_5 = 3381L_5 + 283,46$

Tablica 38. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 4

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [MPa]	R_m [MPa]
1	10,00	4,10	41,00	4404,10	50,00	2140,00	5370,85	52,20
2	9,30	4,20	39,06	4137,00	50,00	1300,00	5295,70	33,28
3	9,60	4,10	39,36	3964,00	50,00	1500,00	5035,57	38,11
4	10,20	4,60	46,92	4326,60	50,00	2000,00	4610,61	42,63
5	10,10	5,00	50,50	3381,00	50,00	1800,00	3347,52	35,64
\bar{X}	9,84	4,40	43,37	4042,54	50,00	1748,00	4732,05	40,37
S	0,38	0,39	3,70	407,47	0,00	347,16	829,09	7,46

U tablici 38 prikazani su rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće, aritmetička sredina te standardna devijacija rezultata ispitivanja. Prema standardnoj devijaciji vidi se da postoje odstupanja kod modula elastičnosti. Razlog je isti kao kod uzorka 1.

3.4.2. Savojna čvrstoća

Na slici 47 vidljive su epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće prije i nakon ispitivanja.

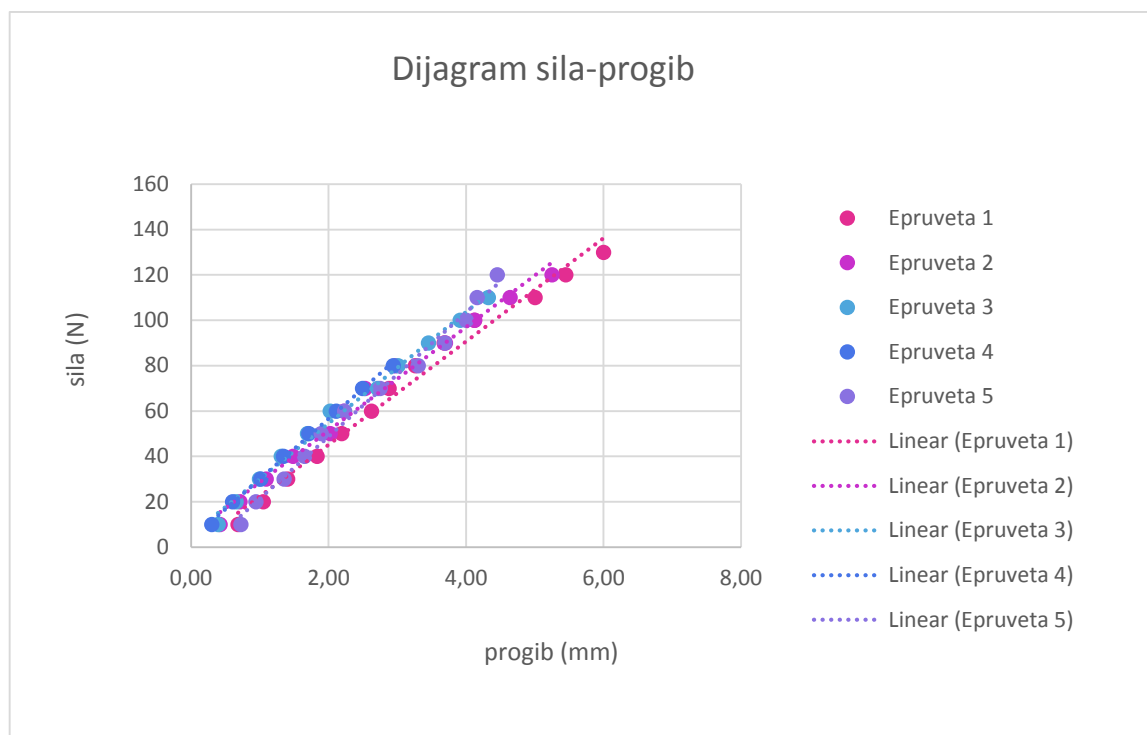


Slika 47. Epruvete prije i poslije ispitivanja savojne čvrstoće uzorka 4

Tablica 39. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 4

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
b [mm]	15,20	15,50	15,10	15,30	14,50
h [mm]	4,30	4,00	4,50	4,20	4,70
S_0 [mm²]	65,36	62	67,95	64,26	68,15
F [N]	Δf [mm]				
10	0,68	0,42	0,39	0,30	0,72
20	1,05	0,71	0,65	0,60	0,94
30	1,40	1,09	0,99	1,01	1,35
40	1,83	1,48	1,31	1,34	1,65
50	2,19	2,02	1,69	1,71	1,89
60	2,62	2,22	2,02	2,11	2,23
70	2,88	2,53	2,71	2,49	2,75
80	3,26	2,97	3,01	2,94	3,30
90	3,68	3,70	3,45	3,30	3,69
100	4,12	4,12	3,91	3,82	4,00
110	5,00	4,64	4,32	4,32	4,16
120	5,45	5,25	4,82	4,79	4,45
130	6,00	6,09	5,38	5,10	4,80
F_{max} [N]	140	130	156	132	192
R_{ms} [MPa]	64,86	68,25	66,43	63,68	78,05

U tablici 39 zabilježeni su progibi u ovisnosti o opterećenju. Progibi su čitani svakih 10 N, sve do 130 N. Na temelju navedene tablice izrađen je dijagram na slici 48.



Slika 48. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 4

Na dijagramu nisu vidljiva veća odstupanja, a vrijednosti nagiba pravca iskorištena su za jednadžbe pravaca na tablici 40.

Tablica 40. Jednadžbe pravaca ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak 4

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 22,769f_1 - 0,3402$
2	$F_2 = 22,8f_2 + 5,8139$
3	$F_3 = 24,555f_3 + 5,4219$
4	$F_4 = 26,535f_4 + 3,5387$
5	$F_5 = 27,366f_5 - 5,9914$

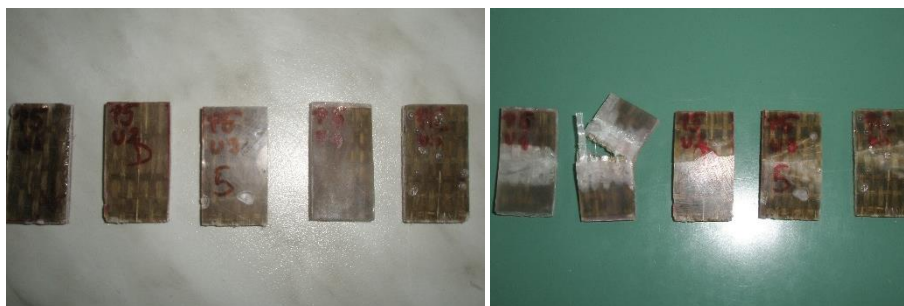
Tablica 41. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 4

Redni broj epruvete	h [mm]	b [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [MPa]	R_{ms} [MPa]	F_{max} [MPa]
1	4,30	15,20	22,769	86,8	3080,3	64,86	140
2	4,00	15,50	22,800	86,8	3757,7	68,25	130
3	4,50	15,10	24,555	86,8	2917,6	66,43	156
4	4,20	15,30	26,535	86,8	3827,2	63,68	132
5	4,70	14,50	27,366	86,8	2972,0	78,05	192
\bar{X}	4,34	15,12	24,805	86,80	3310,96	68,25	150,00
S	0,27	0,38	2,11	0,00	444,10	5,74	25,61

U tablici 41 su prikazani rezultati ispitivanja savojne čvrstoće uzorka 4. Izračunata je aritmetička sredina i standardna devijacija rezultata. Nema većih odstupanja vrijednosti rezultata.

3.4.3. Međuslojna čvrstoća

Slika 49 prikazuje epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće uzorka 4.



Slika 49. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće uzorka 4

Tablica 42 prikazuje rezultate ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 4, njihove srednje vrijednosti i odstupanja.

Tablica 42. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće za uzorak 4

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	F_{max} [N]	τ [MPa]
1	21,6	4,9	1980	14,03
2	22	4,9	900	6,26
3	22	4,8	1040	7,39
4	21	4,7	930	7,07
5	21,5	4,5	600	4,65
\bar{X}	21,62	4,76	1090	7,88
S	0,41	0,17	523,55	3,60

3.4.4. Tvrdoća

Tablica 43. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka 4

očitanje	Uzorak 4		
	10 s	30 s	60 s
1	0,080	0,085	0,085
2	0,085	0,090	0,090
3	0,080	0,085	0,085
4	0,090	0,095	0,095
5	0,100	0,105	0,105
6	0,095	0,100	0,100
7	0,095	0,100	0,100
8	0,115	0,120	0,120
9	0,055	0,060	0,060
10	0,270	0,275	0,275
\bar{X}	0,107	0,112	0,112
S	0,060	0,060	0,060
H [MPa]	79,32	75,77	75,77

Tablica 43 prikazuje rezultate ispitivanja tvrdoće za uzorak 4, njihove srednje vrijednosti i odstupanja. . Dubine prodiranja kuglice su promijenjene za korekcijski faktor.

3.4.5. Udarne žilavost

Tablica 44. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 4

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	A_{cu} [kJ/m ²]
1	10,70	4,23	2,45	54,13
2	10,58	4,13	2,40	54,93
3	10,50	4,18	1,80	41,01
4	10,30	3,68	2,60	68,59
5	10,50	4,36	1,95	42,60
\bar{X}	10,52	4,12	2,24	51,75
S	0,15	0,26	0,35	11,15

Tablica 44 prikazuje rezultate ispitivanja udarne žilavosti za uzorak 4, njihove srednje vrijednosti i odstupanja.

3.5. Uzorak 5. Kompozit ojačan s dva sloja staklene tkanine i jednim slojem lanene tkanine

Postupak izrade je jednak kao u prethodnim uzorcima, važno je napomenuti da su slojevi postavljeni ovim redoslijedom: sloj staklenog ojačala, zatim sloj lanenog ojačala i zatim ponovno sloj staklenog ojačala. Izgled kompozita prikazan je na slici 50.



Slika 50. Kompozit ojačan s dva staklena i lanenom tkaninom

Tablica 45. Prikaz volumnih i masenih udjela uzorka 5

m_k	m_v	w	ρ_{vs}	ρ_{vl}	V_{vl}	V_{vs}	V_v	V_k	ϕ
[g]	[g]	[%]	[g/mm ³]	[g/mm ³]	[mm ³]	[mm ³]	[mm ³]	[mm ³]	[%]
365	46	17	0.0025	0.0015	11600	11372	22972	190373	12

Maseni udio vlakana iznosi 12%, a volumni 8% (slika 45).

Uzorci su izrezani u smjeru lanenih vlakana, jer su u tom smjeru bolja mehanička svojstva.

3.5.1. Rastezna čvrstoća

Na slici 51 prikazane su epruvete na kojima je mjerena rastezna čvrstoća.

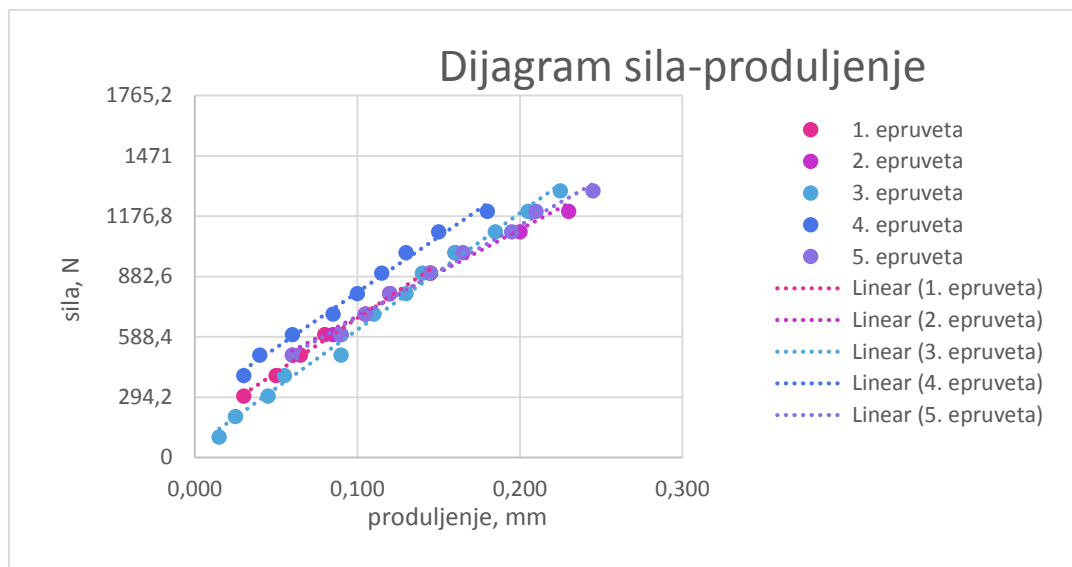


Slika 51. Epruvete prije i poslije ispitivanja rastezne čvrstoće uzorka 5

U tablici 46 vidljiva su produljenja prilikom opterećenja. Produljenja su zabilježavana svakih 100 N. Na temelju podataka iz navedene tablice napravljen je dijagram na slici 52.

Tablica 46. Produljenja pri opterećenju za uzorak 5

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
b [mm]	10,00	10,10	10,00	10,20	10,40
h [mm]	4,40	4,50	4,50	4,10	3,50
S_0 [mm²]	44	45,45	45	41,82	36,4
F [N]	ΔL [mm]				
100	0,005	0,005	0,000	0,005	0,005
200	0,015	0,020	0,001	0,015	0,015
300	0,030	0,030	0,015	0,020	0,030
400	0,050	0,050	0,025	0,030	0,045
500	0,065	0,060	0,045	0,040	0,060
600	0,080	0,085	0,055	0,060	0,090
700	0,105	0,105	0,090	0,085	0,105
800	0,120	0,120	0,090	0,100	0,120
900	0,145	0,145	0,110	0,115	0,145
1000	0,165	0,160	0,130	0,130	0,165
1100	0,180	0,200	0,140	0,150	0,195
1200	0,200	0,230	0,160	0,180	0,210
1300	0,225		0,185	0,190	0,245
1400	0,240		0,205	0,220	0,260
1500			0,225	0,245	0,295
1600					0,335
F_{max} [N]	2260	2520	2880	3060	2580
R_m [MPa]	51,36	55,45	64,00	73,17	70,88



Slika 52. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5

Na dijagramu (slika 52) su vidljiva neka odstupanja. Razlog odstupanja je jednak kao i na uzorku 1. Iz dijagrama su očitani podaci potrebni za izračun modula elastičnosti a prikazani u tablici 47.

Tablica 47. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 5303L_1 + 149,24$
2	$F_2 = 4223L_2 + 266,69$
3	$F_3 = 5688L_3 + 54,63$
4	$F_4 = 5408,4L_4 + 265,17$
5	$F_5 = 4491,5L_5 + 233,76$

Tablica 48. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 5

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	S_0 [mm ²]	$F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	F_{max} [N]	E [MPa]	R_m [MPa]
1	10,00	4,40	44,00	5303,00	50,00	2260,00	6026,14	51,36
2	10,10	4,50	45,45	4223,00	50,00	2250,00	4645,76	49,50
3	10,00	4,50	45,00	5688,00	50,00	2880,00	6320,00	64,00
4	10,20	4,10	41,82	5408,40	50,00	3060,00	6466,28	73,17
5	10,40	3,50	36,40	4491,50	50,00	2580,00	6169,64	70,88
\bar{X}	10,14	4,20	42,53	5022,78	50,00	2606,00	5925,57	61,78
S	0,17	0,42	3,70	630,80	0,00	363,43	734,09	10,92

Vidljiva su određena odstupanja u tablici 48, a razlozi su već objašnjeni prilikom opisa rasteznog ispitivanja uzorka 1.

3.5.2. Savojna čvrstoća

Epruvete prije i poslije ispitivanja savojne čvrstoće uzorka 5 prikazane su na slici 53.

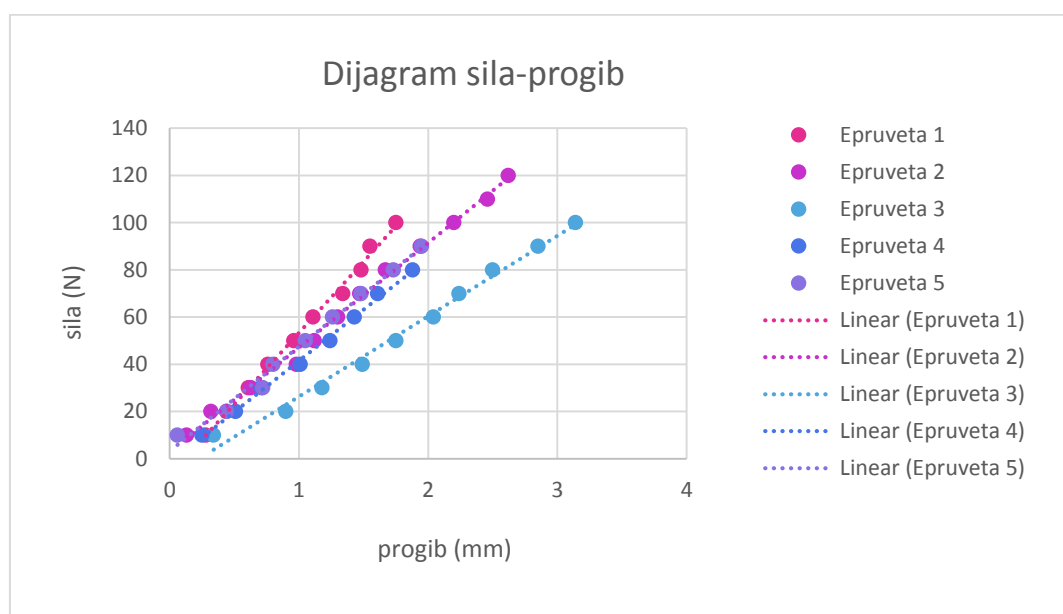


Slika 53. Epruvete prije i poslije ispitivanja savojne čvrstoće uzorka 5

U tablici 49 vidljivi su podaci ovisnosti produljenja o opterećenju, ti podaci su korišteni za izradu dijagrama na slici 54.

Tablica 49. Jednadžbe pravaca ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5

	REDNI BROJ EPRUVETE				
	1	2	3	4	5
b [mm]	14,50	15,50	14,60	15,30	15,50
h [mm]	3,40	4,60	3,90	3,90	3,10
S_0 [mm ²]	49,3	71,3	56,94	59,67	48,05
F [N]	Δf [mm]				
10	0,28	0,13	0,34	0,25	0,06
20	0,44	0,32	0,9	0,51	0,44
30	0,61	0,63	1,18	0,71	0,72
40	0,76	0,98	1,49	1,01	0,8
50	0,96	1,12	1,75	1,24	1,05
60	1,11	1,3	2,04	1,43	1,26
70	1,34	1,47	2,24	1,61	1,48
80	1,48	1,67	2,5	1,88	1,73
90	1,55	1,94	2,85	2,15	1,95
100	1,75	2,2	3,14	2,46	
110	1,95	2,46	3,35	2,67	
120	2,2	2,62	3,76	2,89	
F_{max} [N]	200	486	338	358	370
R_{ms} [MPa]	135,31	168,04	172,60	174,45	281,68



Slika 54. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5

Iz dijagrama se može zamjetiti da jedna epruveta odstupa i to epruveta 3. Razlog je isti kao i kod odstupanja kod uzorka 1. Odstupanje je u granicama prihvatljivog. Na temelju dijagrama je napravljena tablica 50. Podaci iz navedene tablice su potrebni za izračunavanje modula elastičnosti.

Tablica 50. Dijagram ovisnosti produljenja o opterećenju za uzorak 5

Ispitni uzorak	Jednadžba pravca
1	$F_1 = 60,304f_1 - 6,9924$
2	$F_2 = 44,267f_2 + 2,879$
3	$F_3 = 34,058f_3 - 7,7682$
4	$F_4 = 43,379f_4 - 1,8489$
5	$F_5 = 44,333f_5 + 3,2531$

Tablica 51. Prikaz rezultata rastezne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorak 5

Redni broj epruvete	h [mm]	b [mm]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [MPa]	R_{ms} [MPa]	F_{max} [MPa]
1	3,40	14,50	60,304	75,60	11430,0	135,31	200
2	4,60	15,50	44,267	75,60	3169,4	168,04	486
3	3,90	14,60	34,058	75,60	4247,9	172,60	338
4	3,90	15,30	43,379	75,60	5163,0	174,45	358
5	3,10	15,50	44,333	75,60	10370,9	281,68	370
\bar{X}	3,78	15,08	45,27	75,60	6876,25	186,42	350,40
S	0,57	0,49	9,45	0,00	3759,43	55,59	101,98

U tablici 51 vide se jako velika odstupanja. Na uzrok takvih odstupanja najviše utječe razlika u debljini uzoraka koja zbog uvjeta izrade nije mogla biti manja. Osim toga, dodatni razlog je opisan u svojnem ispitivanju uzorka 1.

3.5.3. Međuslojna čvrstoća

Na slici 55 vidljive su epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće uzorka 5



Slika 55. Epruvete prije i poslije ispitivanja međuslojne čvrstoće uzorka 5

Tablica 52. Rezultati ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 5

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	F_{max} [N]	τ [MPa]
1	18,40	3,60	1420,00	16,08
2	16,40	3,20	920,00	13,15
3	17,30	4,00	1340,00	14,52
4	16,50	3,90	1020,00	11,89
5	18,30	3,50	1000,00	11,71
\bar{X}	17,38	3,64	1140,00	13,47
S	0,95	0,32	224,05	1,84

Tablica 52 prikazuje rezultate ispitivanja međuslojne čvrstoće za uzorak 5, njihove srednje vrijednosti i odstupanja.

3.5.4. Tvrdća

Tablica 53. Prikaz rezultata mjerenja tvrdoće uzorka 5

očitanje	uzorak:		
	10 s	30 s	60 s
1	0,07	0,075	0,075
2	0,065	0,07	0,07
3	0,06	0,065	0,065
4	0,06	0,065	0,065
5	0,055	0,06	0,06
6	0,11	0,115	0,115
7	0,18	0,18	0,185
8	0,09	0,095	0,095
9	0,055	0,06	0,06
10	0,05	0,055	0,055
\bar{X}	0,0795	0,084	0,0845
S	0,040	0,038	0,040
H [MPa]	106,26	100,57	99,98

Tablica 42 prikazuje rezultate ispitivanja tvrdoće za uzorak 5, njihove srednje vrijednosti i odstupanja. Izmjerene dubine prodiranja kuglice su promijenjene za korekcijski faktor.

3.5.5. Udarna žilavost

Tablica 54. Prikaz rezultata mjerenja udarnog rada loma uzorka 5

Redni broj epruvete	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	A_{cu} [kJ/m ²]
1	10,44	3,88	3,35	82,70
2	10,50	4,21	3,60	81,44
3	10,11	4,40	2,60	58,45
4	10,30	4,22	2,85	65,57
5	10,26	4,60	3,20	67,80
\bar{X}	10,32	4,26	3,12	70,92
S	0,15	0,27	0,40	10,52

Tablica 42 prikazuje rezultate ispitivanja udarne žilavosti za uzorak 4, njihove srednje vrijednosti i odstupanja.

3.6. Usporedba mehaničkih svojstava svih uzoraka

Tablica 55. Usporedba volumnih i masenih udjela

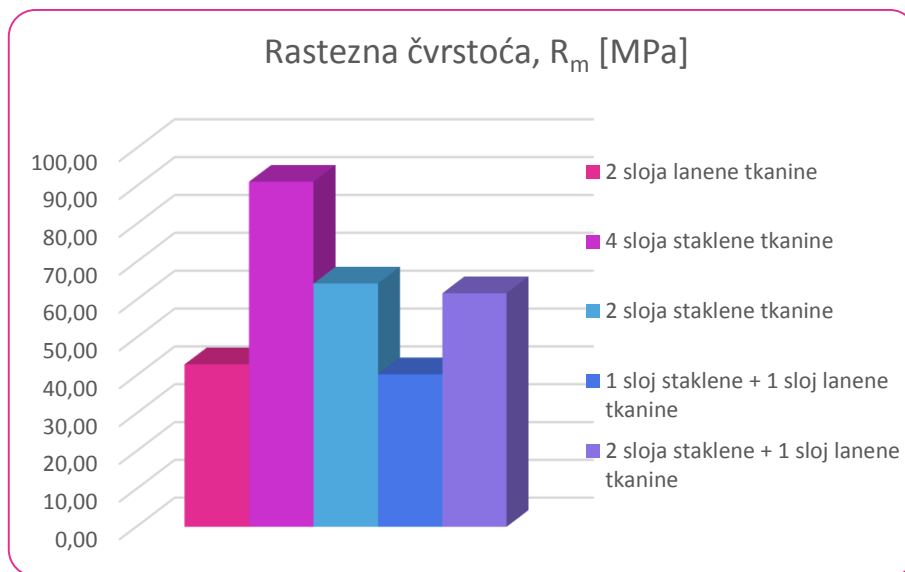
Uzorak	V_k [mm ³]	m_k [g]	w [%]	ϕ [%]
Uzorak 1 (2 sloja lanene tkanine)	230706	295,3	13	12
Uzorak 2 (4 sloja staklene tkanine)	188760	282,7	20	12
Uzorak 3 (2 sloja staklene tkanine)	171417	230,0	14	7
Uzorak 4 (1 sloj staklene + 1 sloj lanene tkanine)	217397	279,0	12	8
Uzorak 5 (2 sloja staklene + 1 sloj lanene tkanine)	190373	365,0	17	12

Na temelju volumnih i masenih udjela (tablica 55) će se interpretirati rezultati. Uzorak 1, 2 i 5 imaju jednake volumne udjele te se za te uzorke očekuju bolji rezultati jer kompoziti ojačani staklenim vlaknima imaju visoku specifičnu čvrstoću. Jedna od glavnih prednosti stakla pred lanom je ta što je za istu čvrstoću staklo znatno tanje. Kada bi interpretirali masene udjele teoretski bi svojstva lana i stakla istih masenih udjela trebala biti usporediva. U nastavku slijedi usporedba prema napravljenim ispitivanjima.

3.6.1. Rastezna čvrstoća

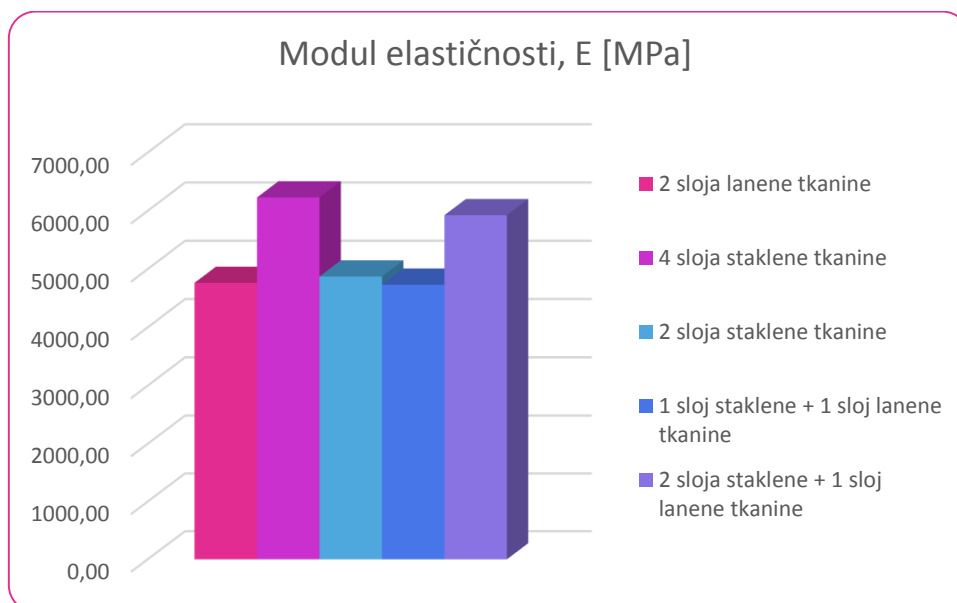
Tablica 56. Usporedba uzoraka prema rasteznoj čvrstoći i modulu elastičnosti

Uzorak	b [mm]	h [mm]	S_0 [mm ²]	$\Delta F/\Delta L$ [N/mm]	L [mm]	E [MPa]	R_m [MPa]	F_{max} [N]
Uzorak 1 (2 sloja lanene tkanine)	10,58	4,72	49,94	4759,52	50	4764,42	42,98	2152
Uzorak 2 (4 sloja staklene tkanine)	9,88	4,50	44,45	5533,44	50	6229,40	91,21	4052
Uzorak 3 (2 sloja staklene tkanine)	9,82	3,60	35,35	3457,94	50	4873,66	64,34	2276
Uzorak 4 (1 sloj staklene + 1 sloj lanene tkanine)	9,84	4,40	43,37	4042,54	50	4732,05	40,37	1748
Uzorak 5 (2 sloja staklene + 1 sloj lanene tkanine)	10,14	4,20	42,53	5022,78	50	5925,57	61,78	2606



Slika 56. Usporedba uzoraka prema rasteznoj čvrstoći

Iz dijagrama na slici 56. i iz tablice 56 vidljivo je da najveću rasteznu čvrstoću ima uzorak 2 ojačan sa četiri sloja stakla. Uzorak 1 koji ima jednaki volumni udio lanenih ojačala ima upola manju rasteznu čvrstoću. Zanimljivo je vidjeti da uzorci ojačani s dva sloja stakla imaju malo bolju rasteznu čvrstoću od kompozita koji uz dva sloja stakla ima i jedan sloj lana. Također kompoziti koji imaju dva sloja lana imaju podjednaku vrijednost kao i kompozit ojačan slojem stakla i lana. Iz navedenog se može zaključiti da je rastezna čvrstoća lana znatno slabija od rastezne čvrstoće stakla.



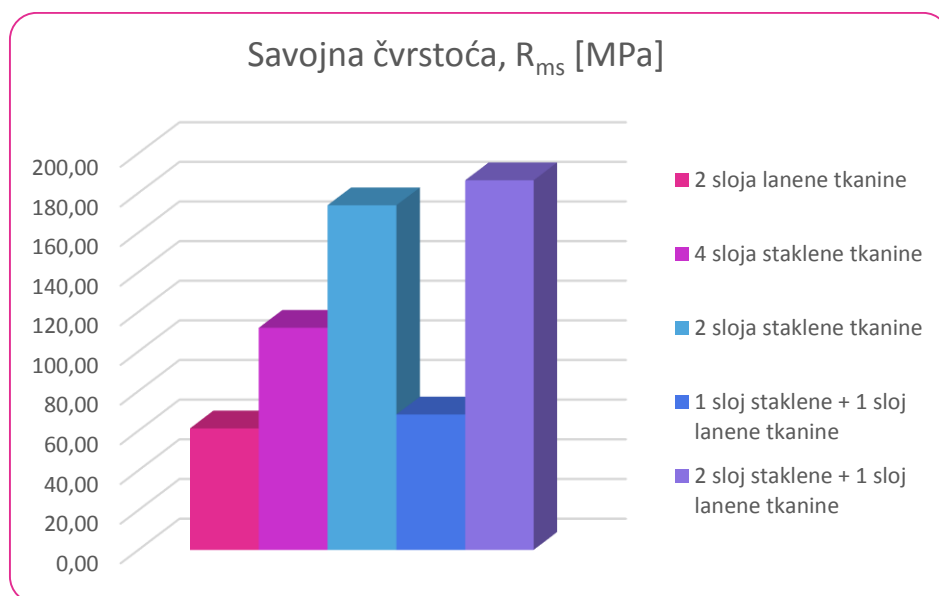
Slika 57. Usporedba uzoraka prema modulu elastičnosti

Uspoređujući module elastičnosti (slika 57) ispravlja se slika dobivena o lanenim ojačalima dobivena uspoređujući rastezne čvrstoće uzoraka. Modul elastičnosti je podjednak uzorcima 1,3,4, a to su uzorci ojačani s dva lana, uzorak ojačan sa dva stakla i uzorak ojačan slojem stakla i slojem lana. Bitno je zamijetiti da ti uzorci imaju podjednake masene udjele ojačala. Moduli elastičnosti uzorka ojačanog sa 4 staklene tkanine (uzorak 2) je približno jednak onome ojačanom sa dva stakla i lanom (uzorak 5). Oni također imaju podjednake masene udjele.

3.6.2. Savojna čvrstoća

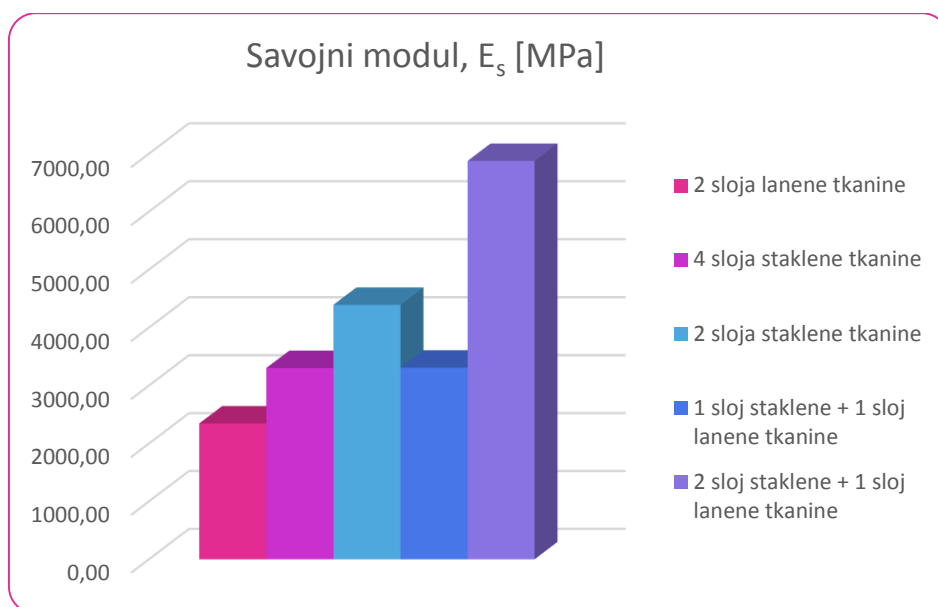
Tablica 57. Usporedba savojnih čvrstoća i savojnih modula elastičnosti svih uzoraka

Uzorak	h [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	L [mm]	E_s [MPa]	R_{ms} [MPa]	F_{max} [N]
Uzorak 1 (2 sloja lanene tkanine)	5,02	14,92	74,90	17,870	100,0	2347,72	61,21	154,0
Uzorak 2 (4 sloja staklene tkanine)	4,34	14,64	63,54	24,089	87,2	3304,02	111,95	237,6
Uzorak 3 (2 sloja staklene tkanine)	3,63	15,30	55,54	33,093	72,5	4393,61	173,83	320,0
Uzorak 4 (1 sloj staklene + 1 sloj lanene tkanine)	4,34	15,12	65,62	24,805	86,8	3310,96	68,25	150,0
Uzorak 5 (2 sloja staklene + 1 sloj lanene tkanine)	3,78	15,08	57,00	45,270	75,6	6876,25	186,42	350,4



Slika 58. Usporedba savojnih čvrstoća

Iz tablice 57 i dijagrama na slici 58 moguće je vidjeti da najveću savojnu čvrstoću ima kompozit ojačan s dva sloja staklenih i jednim slojem lanenog ojačala (uzorak 5). Vrlo dobra svojstva pokazuje i kompozit ojačan s dva sloja staklenog vlakna. Neobična pojava je da kompozit ojačan s četiri sloja staklenog vlakna (uzorak 2) ima manje vrijednosti od uzorka ojačanog s dva sloja staklenog vlakna (uzorak 3). Razlog tome bi mogao biti nepravilni raspored ojačala u kompozitu zbog velikog udjela matrice. Kompozit ojačan s dva sloja lanenih vlakana (uzorak 1) ima najmanju savojnu čvrstoću, a slično njemu i kompozit ojačan sa slojem staklene i lanene tkanine (uzorak 4). Nije moguće naći neku poveznicu ponašanja uzoraka obzirom na masene i volumne udjele.



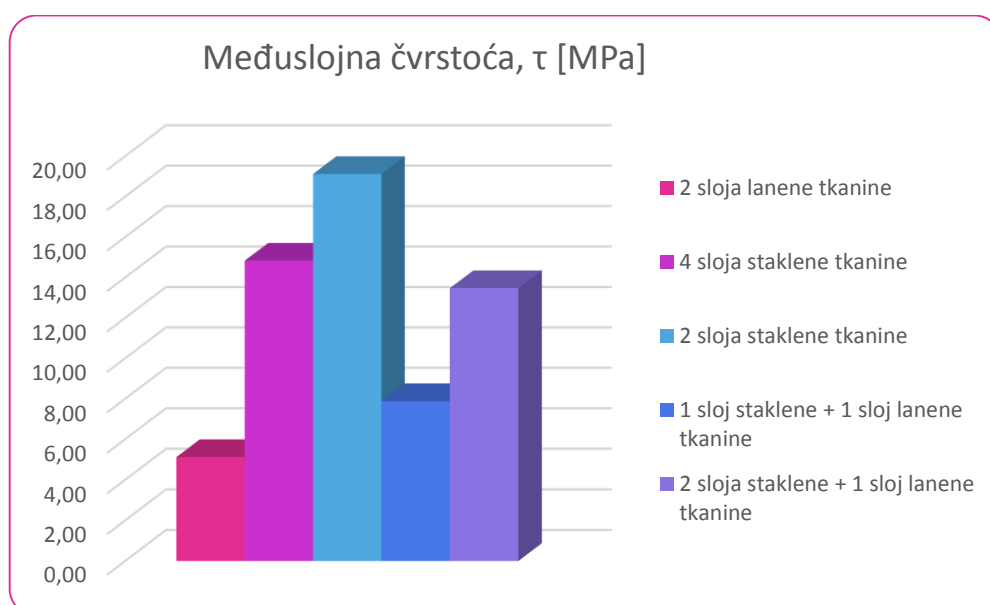
Slika 58. Usporedba uzoraka prema savojnom modulu elastičnosti

Na dijagramu prikazanom na slici 58 nema značajnih promjena odnosa od rezultata savojne čvrstoće. Najbolji savojni modul elastičnosti koji značajno odskače od ostalih ima uzorak 5 ojačan s dva sloja staklenog ojačala i jednim slojem lanenog ojačala. Podjednake vrijednosti imaju uzorci 2 i 4. Najmanju vrijednost savojnog modula elastičnosti pokazuje kompozit ojačan lanenim tkaninama (uzorak 1).

3.6.3. Međuslojna čvrstoća

Tablica 58. Usporedba međuslojne čvrstoće

Uzorak	b [mm]	h [mm]	F_{\max} [N]	τ [N/mm ²]
Uzorak 1 (2 sloja lanene tkanine)	21,52	4,70	688,00	5,12
Uzorak 2 (4 sloja staklene tkanine)	20,34	3,34	1343,80	14,83
Uzorak 3 (2 sloja staklene tkanine)	18,40	3,24	1496,00	19,12
Uzorak 4 (1 sloj staklene + 1 sloj lanene tkanine)	21,26	4,76	1090,00	7,88
Uzorak 5 (2 sloja staklene + 1 sloj lanene tkanine)	17,38	3,64	1140,00	13,47



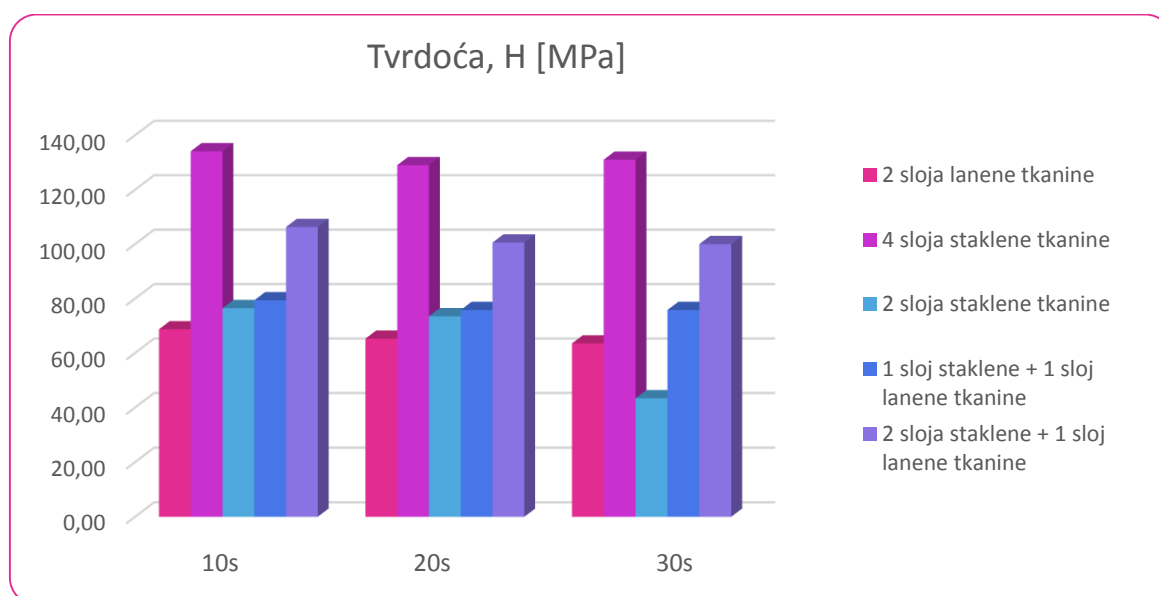
Slika 59. Dijagram usporedbe ispitnih uzoraka prema međuslojnoj čvrstoći

Najbolju međuslojnu čvrstoću (tablica 58, slika 59) pokazuje uzorak s dva sloja staklenog ojačala (uzorak 3). Općenito uzorci ojačani samo staklenim tkaninama pokazuju bolja međuslojna svojstva nego i jedan ojačan lanenim vlaknima. Najgora međuslojna svojstva ima kompozit ojačan samo lanenim vlaknima (uzorak 1).

3.6.4. Tvrdća

Tablica 59. Usporedba tvrdoća

Uzorak	Tvrdća, H [MPa]		
	10s	20s	30s
Uzorak 1 (2 sloja lanene tkanine)	68,68	65,24	63,47
Uzorak 2 (4 sloja staklene tkanine)	134,10	128,98	130,98
Uzorak 3 (2 sloja staklene tkanine)	76,45	73,46	43,32
Uzorak 4 (1 sloj staklene + 1 sloj lanene tkanine)	79,32	75,77	75,77
Uzorak 5 (2 sloja staklene + 1 sloj lanene tkanine)	106,26	100,57	99,98



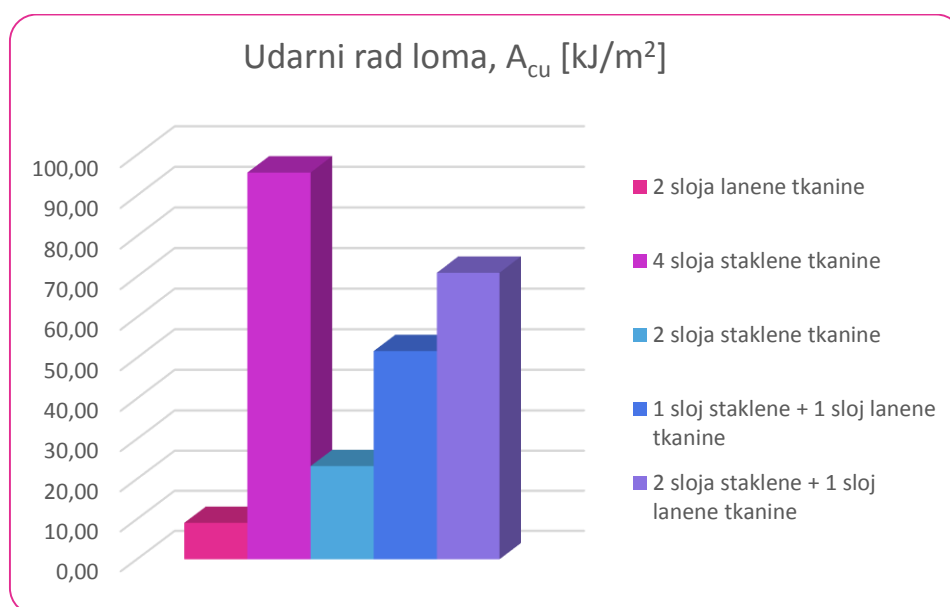
Slika 60. Usporedba uzoraka prema tvrdoći

Iz tablice 59 i dijagrama sa slike 60 je vidljivo da su tvrdoće uzoraka 2 i 5 veće od tvrdoća ostalih uzoraka. Uzorak 2 je ojačan s 4 sloja staklene tkanine, a uzorak 5 je ojačan s dva sloja staklene tkanine i jednim slojem lanene tkanine. Navedeni uzorci su ujedno i uzorci s najvećim brojem slojeva ojačala.

3.6.5. Udarne žilavost

Tablica 60. Usporedba udarne žilavosti uzoraka

Uzorak	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	A_{cu} [kJ/m ²]
Uzorak 1 (2 sloja lanene tkanine)	10,35	4,47	3,19	68,96
Uzorak 2 (4 sloja staklene tkanine)	10,58	3,34	3,38	95,65
Uzorak 3 (2 sloja staklene tkanine)	10,13	3,24	0,78	23,24
Uzorak 4 (1 sloj staklene + 1 sloj lanene tkanine)	10,52	4,12	2,24	51,68
Uzorak 5 (2 sloja staklene + 1 sloj lanene tkanine)	10,32	4,26	3,12	70,97



Slika 61. Usporedba uzoraka prema udarnom radu loma

Na slici 61 i tablici 60 udarni rad loma je najveći kod kompozita ojačanog s četiri sloja staklenog vlakna. Nešto manje vrijednosti ima kompozit ojačan s dva sloja lanenih vlakana (uzorak 1). Perma dijagramu može se zaključiti da lan ima dobru udarnu žilavost te da povoljno utječe na nju kod kompozita ojačanih i lanom i staklom.

4. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali ojačani lanenim vlaknima moguća su alternativa za staklena vlakna, ali samo za određene primjene gdje se za početak ne zahtjeva mala debljina jer su lanena pletiva još uvijek znatno deblja od staklenih. Staklena vlakna su filamentna i ujednačena, što se sa lanenim ne može postići. Prednosti lanenih vlakana je ta što su biorazgradiva i oporabljiva. Osim toga svi su dijelovi biljke iskoristivi bilo u prehrambene, tekstilne ili tehničke svrhe.

U radu je ispitano 5 uzoraka ojačanih staklenim vlaknima, lanenim vlaknima ili kombinacijom lanenih i staklenih vlakana. Rastezna čvrstoća je bolja staklenim nego lanenim vlaknima i to značajno. Prilikom izračuna modula elastičnosti umanjuju se razlike i bolja svojstva uz uzorak s četiri sloja stakla pokazuje i uzorak ojačan s dva sloja stakla i jednim lanom u odnosu na ostale uzorke. Kod savojne čvrstoće jako se dobrim pokazao uzorak ojačan s dva sloja staklene tkanine i jednim slojem lanene tkanine. Uzorak ojačan samo lanom ima znatno nižu savojnu čvrstoću. Savojni modul elastičnosti se pokazao najbolji kod uzorka ojačanog sa dva sloja stakla i jednim lanom, a najbolja mu je bila i vrijednost međuslojne čvrstoće i udarne žilavosti. Iz dosadašnjih izlaganja treba zamijetiti kako je određena kombinacija staklenih i lanenih vlakana vrlo povoljnih mehaničkih svojstava. Lanena vlakna bi svoju primjenu mogla naći u izradi interijera za automobile, izradi kompozitnih brodica, izradi kutija za prijenos instrumenata i nekih predmeta s estetskim zahtjevima. Za kraj valja napomenuti da riječ „prirodno“ ispred polimera i kompozita valja uvijek uzeti s rezervom jer nije uvijek riječ o biorazgradivom materijalu pa čak niti o materijalu prirodnog podrijetla. A za svaki pojedini slučaj treba imati na umu način uporabe, riječ prirodno u nazivu nužno ne znači da se slobodno može odložiti u prirodi.

LITERATURA

- [1] Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof; Svojstva i primjena materijala; Zagreb 2002
- [2] Dr. Sc. Gojko Marić; Kompoziti; Podloge predavanja iz kolegija Materijali II;;16.11.2014
- [3] Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal, Susan E. Selke, Bruce R. Harte, and Georg Hinrichsen. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites
- [4] Utjecaj recikliranja na mehanička svojstva drvno-plastomernoga kompozita Maja RUJNIĆ-SOKELE, Mladen ŠERCER, Božo BUJANIĆ 14.6.2014.
- [5] <http://www.reinforcedplastics.com/view/391/composites-that-grow-in-fields> 16.11.2014
- [6] Kompoziti u automobilske industriji, Goran MILARDOVIĆ, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
- [7] <http://textilelearner.blogspot.com/2012/01/linen-fiber-characteristics-of-linen.html?m=1> 16.11.2014
- [8] Škobalj, D. Kompoziti drvo plastika-mogućnost kombiniranja plastike i drva, članak Mangino, E. et al.: The future use of structural composite materials in the automotive industry, citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.138.1771&rep=rep1&type=pdf
- [9] N.N.: Wood-Plastic Composites, TimbaPlus, <http://www.timbaplus.co.uk/TechnicalReview.pdf> 16.11.2014
- [10] N. N.: An Investigation of the Potential to Expand the Manufacture of Recycled Wood, Plastic Composite Products in Massachusetts, Chelsea Center for Recycling and Economic Development, 2000, <http://www.chelseacenter.org/pdfs/TechReport19.pdf> 16.11. 2014.

-
- [11] <http://sensiseeds.com/en/blog/how-to-start-a-hemp-business-uk/> 16.11.2014.
- [12] <https://everythingpossible.wordpress.com/tag/pineapple-fibre/> 16.11.2014
- [13] <http://www.enciklopedija.hr//natuknica.aspx?ID=59076> 16.11.2014.
- [14] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114002211> 16.11.2014.
- [15] <http://www.enciklopedija.hr//natuknica.aspx?ID=65693> 16.11.2014.
- [16] <http://www.textileassociationindia.org/images/191/Page%20371-378.pdf> 16.11.2014.
- [17] Branka Andričić; Prirodni polimerni materijali; Split 2008
- [18] N. N. : Bioplastics, www.european-bioplastics.org, 20. 7. 2007.
- [19] Johansson, J.-E. : Plastics – a vital enabler in an integrated resource management strategy Landfill to recovery, PlasticsEurope, Otepää, 11.5.2007.
- [20] Istine i zablude o bioplastici; Maja RUJNIĆ-SOKELE; Polimeri: Plastics and Rubber Journal, Vol.28 No.3 January 2008.
- [21] <http://www.fsb.unizg.hr/polimeri/fileopen.php?id=956> 16.11.2014
- [22] Šprajcar, M., Horvat, P., Kržan, A., Biopolimeri in bioplastika–Plastika skladna z naravo, Kemijski inštitut, Ljubljana, 2012.
- [23] Šercer, M., Biopolimeri, Podloge za predavanja iz kolegija „Polimerni materijali“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [24] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x/full> 16.11.2014.
- [25] http://genelpamuk.com.tr/genelpamuk/kategori.php?kat=iletisim_bilgileri 16.11.2014.
- [26] <http://www.estacaovida.org.br/tag/soja/> 16.11.2014
- [27] Frederick T. Wallenberger, Norman E. Weston; Natural Fibers, Plastics and Composites

- [28] Ristić, I., Nikolić, Lj., Cakić S., Poli(laktid): Dostignuća i perspektive, Savremene tehnologije 1 (1) (2012),str. 67-77.
- [29] Askeland, D. R., The Science and Engineering of Materials, PWS-KENT, Boston, 1989.
- [30] <http://www.omniskompozit.com/files/upload/files/POLIPOL%203401.pdf> 18.11.2014
- [31] Franz M., Kovačiček F., Novosel M., Indof J., Inženjerski priručnik ip4, 1. svezak, ŠK, Zagreb, 1998.
- [32] Landek D., Materijali i proizvodni postupci 2012/2013, autorizirana predavanja iz područja materijala
- [33] Cajner H., Šakić N., Autorizirana predavanje iz kolegija Optimiranje i planiranje pokusa, FSB, Zagreb, 2011.
- [34] Mehaničke osobine materijala,

<http://polj.uns.ac.rs/Files/materijali/8%20Mehanicke%20osobine.pdf> 22.11.2014